

Technologiebericht

6.3 Stromerzeugungstechnologien zur Abwärmenutzung innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende

Bodo Groß

Hannah Manns

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Groß, B.; Manns, H. (2018): Technologiebericht 6.3 Stromerzeugungstechnologien zur Abwärmenutzung. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Dr. Bodo Groß

Tel.: +49 681 / 844 972 51

Fax: +49 681 / 7617999

E-Mail: gross@izes.de

Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme gGmbH
Altenkesseler Straße 17A
66115 Saarbrücken

Review durch:

Dietmar Schüwer (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	4
Tabellenverzeichnis	5
Zusammenfassung (Steckbrief)	8
1 Beschreibung des Technologiefeldes	10
1.1 Thermoelektrische Generatoren	10
1.2 ORC-Prozess	11
1.3 Kalina-Prozess	12
2 Stand F&E in Deutschland	14
2.1 Thermoelektrische Generatoren	14
2.2 ORC-Prozess	15
2.3 Kalina-Prozess	15
3 Relevanz öffentlicher Förderung	16
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	16
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	17
4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	22
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	22
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen	32
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	34
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	35
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	37
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	40
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	44
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	46
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	48
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	49
5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	53
5.1 Thermoelektrische Generatoren	53
5.2 ORC-Prozess	53
5.3 Kalina-Prozess	54
Literaturverzeichnis	55

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

BAU	Business-as-usual
BHKW	Blockheizkraftwerk
DPMA	Deutsches Patent- und Markenamt
EE	Endenergie
EEV	Endenergieverbrauch
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
Kalina	Kalina-Prozess
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
ORC	Organic Rankine Cycle
PE	Primärenergie
PEV	Primärenergieverbrauch
TEG	Thermoelektrischer Generator
TEM	Thermoelektrisches Modul
THG	Treibhausgas
ZT	Thermoelektrische Gütezahl

Einheiten und Symbole


%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
a	Jahr
BiTe	Wismuttellurid
CoAs	Cobaldarsenid
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
PbTe	Bleitellurid
TW	Terrawatt
TWh	Terrawattstunde

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Techno-ökonomische Kenndaten von TEG -----	11
Tab. 1-2	Techno-ökonomische Kenndaten von ORC-Anlagen -----	12
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung Thermoelektrischer Generatoren -----	16
Tab. 3-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von ORC-Anlagen -----	17
Tab. 3-3	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Kalina-Anlagen -----	17
Tab. 3-4	Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme -----	18
Tab. 3-5	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken bei Thermoelektrischen Generatoren -----	19
Tab. 3-6	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken bei ORC-Anlagen -----	20
Tab. 3-7	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken bei Kalina-Anlagen -----	20
Tab. 3-8	Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme -----	21
Tab. 4-1	Analyse des globalen industriellen Abwärmepotenzials für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in TWh _{th} -----	23
Tab. 4-2	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in TWh _{el} -----	24
Tab. 4-3	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in GW _{el} -----	24
Tab. 4-4	Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in TWh _{el} -----	25
Tab. 4-5	Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in GW _{el} -----	25
Tab. 4-6	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in TWh _{el} -----	26
Tab. 4-7	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in GW _{el} -----	26
Tab. 4-8	Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in TWh _{el} -----	26
Tab. 4-9	Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in GW _{el} -----	27
Tab. 4-10	Analyse des nationalen industriellen Abwärmepotenzials für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in TWh _{th} -----	27
Tab. 4-11	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in GWh _{el} -----	28
Tab. 4-12	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in MW -----	28
Tab. 4-13	Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in GWh -----	29
Tab. 4-14	Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in MW -----	29
Tab. 4-15	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in GWh -----	29
Tab. 4-16	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in MW -----	30
Tab. 4-17	Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in GWh -----	30
Tab. 4-18	Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in MW -----	30
Tab. 4-19	Ermittlung Wachstumsrate für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme -----	32

Tab. 4-20	Monetarisierung des Marktpotenzials -----	32
Tab. 4-21	Jährlich vermiedene THG-Emissionen durch Nutzung der Technologien TEG und ORC des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	33
Tab. 4-22	Jährlich vermiedene THG-Emissionen durch Nutzung von TEG zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	33
Tab. 4-23	Jährliche vermiedene THG-Emissionen durch Nutzung von ORC-Anlagen zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	34
Tab. 4-24	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	35
Tab. 4-25	Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale durch das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr) -----	36
Tab. 4-26	Jährlich vermiedene externe Kosten in Deutschland durch das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme im 80 %-Szenario für den Schadstoff CO ₂ -----	37
Tab. 4-27	Jährlich vermiedene externe Kosten in Deutschland durch das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme im 95 %-Szenario -----	37
Tab. 4-28	Analyse des bisherigen Marktanteils für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme -----	38
Tab. 4-29	Globales und nationales Marktpotenzial für Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme -----	38
Tab. 4-30	Inländische Wertschöpfung basierend auf Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme hinsichtlich des globalen und des nationalen Absatzmarktes -----	39
Tab. 4-31	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie im Bereich Thermoelektrischer Generatoren innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme -----	41
Tab. 4-32	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie im Bereich ORC-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme -----	41
Tab. 4-33	Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung im Bereich Thermoelektrische Generatoren innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme – Output-Orientierung -----	42
Tab. 4-34	Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung im Bereich ORC-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme – Output-Orientierung -----	43
Tab. 4-35	Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung im Bereich Kalina-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme – Output-Orientierung -----	43
Tab. 4-36	Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme zum Status Quo (2015) -----	45
Tab. 4-37	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme (TEG) -----	47
Tab. 4-38	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme (ORC) -----	48
Tab. 4-39	Abhängigkeit des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme von Infrastrukturen -----	49

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. 6.3 Technologien zur Abwärmenutzung			 izesgGmbH Institut für ZukunftsEnergieSysteme			
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf						
Beschreibung des Technologiefeldes						
– A: Thermoelektrische Generatoren (TEG) – B: Organic Rankine Cycle (ORC)-Anlagen – C: Kalina- Anlagen (nur am Rand betrachtet, da derzeit sehr wenig Aktivitäten und Anlagen)						
Technologische Reife: TEG: Technologieentwicklung – Kommerzialisierung (TRL=2-9) ORC: Demonstration – Kommerzialisierung (TRL=6-9)						
Kritische Komponenten: – TEG: derzeit verwendete Materialien wie Tellur, Dauerhaltbarkeit der Verbindungstechnik – ORC: Wärmeübertrager, Expansionsmaschinen mit kleiner Leistung, eingesetzte Kältemittel						
Entwicklungsziele						
– TEG: Steigerung des Wirkungsgrades auf > 13 %, Kostensenkung auf ~ 1 €/W – ORC: Steigerung des Wirkungsgrades auf > 20 %, absolut, Kostensenkung auf ~ 1 €/W						
Technologie-Entwicklung						
	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Marktpotential Deutschland *	MW	100	220	550	1.220	2.050
Marktpotential global *	GW	5	10	25	55	88
Durchschnittliche Nennleistung	kW	10 ⁻⁴ –10.000	10 ⁻⁴ –10.000	10 ⁻⁴ –15.000	10 ⁻⁴ –15.000	10 ⁻⁴ –20.000
Volllaststunden	h/a	4.400–6.000	4.400–6.000	4.400–6.000	4.400–6.000	4.400–6.000
Lebensdauer	a	5–15	8–15	10–20	15–20	20
Investition	€/kW	1.000–40.000	1.000–10.000	1.000–5.000	750–2.500	750–1.500
Variable Betriebskosten (TEG)	€ _{ct} /kWh	k.A., aufgrund der Wartungsfreiheit ist von 0 auszugehen				
Variable Betriebskosten (ORC)	€ _{ct} /kWh	2,5–2,0	2,0	2,0–1,5	2,0–1,5	1,5
Stromgestehungskosten	€ _{ct} /kWh	182–4,5	28,4–2,8	11,4–2,3	4,1–1,1	2,8–0,9
* Szenarienbereich DE_80 % bzw. INT_2 °C (Durchschnittlicher Zubau pro Dekade)						
F&E-Bedarf						
– A & B: Hohes technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko. – A: Verbindungstechnik, Materialentwicklung im Temperaturbereich 200 – 400 °C, großserientaugliche Produktionskonzepte, Substitution von kritischen Rohstoffen, Erhöhung der Lebensdauer – B: Speziell auf ORC ausgelegte Wärmeübertrager. Entwicklung neuer klimaneutraler Kältemittel						

B) Multikriterielle Bewertung
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> – Nettoeinsparung von THG (TEG + ORC): 2030: 1,46 – 1,91 Mio. t/a, 2050 4,04 – 4,29 Mio. t/a, da vorhandene Abwärme bei Nichtnutzung verloren geht bzw. nicht extra für Nutzung produziert werden muss. – Keine negativen Auswirkungen erkennbar.
Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> – Nettoeinsparung von Primärenergie (TEG + ORC): 2030: 1,09 – 1,36, 2050 2,3 – 3,0 PJ/a da vorhandene Abwärme bei Nichtnutzung verloren geht bzw. nicht extra zur Nutzung produziert wird. – Ggf. erheblicher Verbrauch kritischer Rohstoffe (Blei, Tellur, halogenierte Kohlenwasserstoffe)
Kosteneffizienz (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> – A & B: Kostensenkung bis 2030: 3,1 – 15,2 Mio. €/a, 2050 108 – 136 Mio. €/a. – A: Betriebskosten sehr gering, da nahezu wartungsfrei.
Inländische Wertschöpfung
<ul style="list-style-type: none"> – A: Gute Voraussetzungen für einen Anstieg der inländischen Wertschöpfung im Falle der erfolgreichen Entwicklung von Halb-Heusler-, Skutterudit- und Silizid und Nanomaterialien – B: Im Bereich Turbinen eher gering, im Sub-MW Bereich gute Möglichkeiten.
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich
<ul style="list-style-type: none"> – A: Wettbewerbsfähig bei der Entwicklung neuer Materialien, Notwendigkeit der Entwicklung einer automatisierten industriellen Herstellung für den Breitenmarkt. Patente rund 10 % – B: Wettbewerbsfähig im kleinen Leistungsbereich sowie im Bereich Hubkolbenmaschinen. – A (B): Rate der Patente mit deutscher Beteiligung liegt bei rund 10 % (4 %)
Gesellschaftliche Akzeptanz
<ul style="list-style-type: none"> – A: Sehr geringes Risiko für gesellschaftliche Akzeptanz da emissions- und geräuschlos, Marktakzeptanz abhängig von der Wirtschaftlichkeit/den Kosten; derzeit hohes, zukünftig niedriges Risiko. – B: Sehr geringes Risiko für gesellschaftliche Akzeptanz da emissionslos; Marktakzeptanz abhängig von der Wirtschaftlichkeit/den Kosten; derzeit eher niedriges, zukünftig niedriges Risiko.
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit
A & B: Planungszeiten mittel, Nutzungsdauer lang Bauzeit abhängig von der Komplexität des Wärmeübertragers, da dieser individuell auf die jeweilige Abwärmequelle angepasst werden muss.
Abhängigkeit von Infrastrukturen
A & B: Für beide Technologien müssen bestehende Infrastrukturen angepasst werden. Dies betrifft insbesondere die Integration der Wärmeübertrager in bestehende Strukturen
Systemkompatibilität
A & B: Die Systemkompatibilität ist unter derzeitigen Bedingungen ohne Anpassungsbedarf gegeben, Risiken ergeben sich hinsichtlich der vorhandenen Abwärmequellen, speziell hinsichtlich langfristiger Verfügbarkeit bei einem gleichbleibendem Temperaturniveau etc.

1 Beschreibung des Technologiefeldes

Dieses Technologiefeld beinhaltet die Technologien Thermoelektrische Generatoren, ORC- und Kalina-Maschinen. Eine allgemeine Beschreibung des Technologiefelds ist aufgrund der extremen Heterogenität der unterschiedlichen Technologien schwierig und beinhaltet aus diesem Grund auch bei der Beschreibung der einzelnen Kriterien eine gewisse Unschärfe.

1.1 Thermoelektrische Generatoren

Der Überbegriff Thermoelektrik beschreibt einen Vorgang, bei dem Wärme mit Hilfe von Halbleitern direkt und ohne bewegliche Teile in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Wandlung von Wärme in elektrischen Strom ist bekannt als sogenannter Seebeck-Effekt. Die technische Umsetzung dieses Vorgangs geschieht in sogenannten Thermoelektrischen Generatoren (TEG). Sie bestehen typischerweise aus zwei Wärmeübertragern zur Erzeugung einer heißen und einer kalten Seite. Dazwischen befinden sich thermoelektrische Module (TEM). Diese wandeln die sie durchfließende Wärme teilweise in elektrische Energie um. Je nach eingesetztem Halbleitermaterial können TEG in unterschiedlichen Temperaturbereichen eingesetzt werden. Die direkte Wandlung von Strom in ein Temperaturgefälle ist ebenfalls möglich. Dieser Effekt entspricht der Umkehrung des Seebeck-Effekts und wird als Peltier-Effekt bezeichnet.

Derzeit sind im Niedrigtemperaturbereich $< 250\text{ °C}$ BiTe-Module kommerziell erhältlich. Der Wirkungsgrad beträgt bei dieser Materialklasse derzeit bis zu 5 %. Kommerzielle, segmentierte Module, bei denen Wismut- und Bleitellurid (BiTe, PbTe) miteinander kombiniert werden, erreichen Wirkungsgrade von bis zu 7 % bei einer Einsatzhöchsttemperatur von etwa 540 °C . Ein erhebliches Forschungspotenzial bieten insbesondere die Materialklasse der Skutterudite (abgeleitet von Mineral Skutterudit CoAs_3), Halb-Heusler-Legierungen, Silizide sowie modifizierte BiTe-Module, die eine erweiterte Temperaturstabilität haben. Kaskadierte Module konnten im Laborversuch bereits Wirkungsgrade von bis zu 20 % erreichen (Fraunhofer IPM 2016).

Maßgeblich zur Bewertung eines Materials zur thermoelektrischen Nutzung ist der ZT-Wert (Thermoelektrische Gütezahl), welcher die Effizienz eines Materials angibt. Derzeit liegt dieser Wert bei kommerziellen Generatoren bei 1, Demonstrationsanlagen können jedoch bereits Werte von bis zu 2,4 erreichen (Wietschel et al. 2010: 859). Eine wirtschaftliche, kommerzielle und breite Anwendung auch in Haushalten wird bei Materialien mit einem ZT-Wert ab 3 erwartet (Forschungszentrum Jülich 2017).

Eingesetzt werden TEG derzeit hauptsächlich zur Verstromung von Abwärme aus Verbrennungsabgasen aus Biomasseheizkraftwerken, aber auch aus Automobilabgasen (IZES 2016). Abseits davon werden Thermoelektrische Elemente in der Raumfahrt, als Sensoren in Messstationen sowie – unter Ausnutzung des Peltier-Effekts – zur autarken Energieversorgung der Kühlung von Autositzen, in Herzschrittmachern und auch in Campinganwendungen eingesetzt. In Entwicklungs- und Schwellenländern werden TEG verwendet, um Ventilatoren anzutreiben, die Verbrennungsvor-

gänge bei Biomassekochstellen verbessern und dadurch die entstehenden Emissionen verringern (Forschungszentrum Jülich 2017).

Die techno-ökonomischen Kenndaten von TEG, sowohl von heute als auch bis 2050 prognostiziert, werden in Tab. 1-1 dargestellt. Die Volllastbetriebsstunden für TEG werden mit 4.400 h/a angesetzt. Aufgrund der extremen Heterogenität der Materialien erfolgt die Angabe des Wirkungsgrades eher am unteren Bereich der Erwartungen. Einzelne in der Entwicklung befindliche Materialien haben zum Teil einen deutlich höheren Wirkungsgrad (Fraunhofer IPM 2016). Je nach Beschaffenheit und Qualität/Reinheit der genutzten Abwärmequelle kann eine periodische Reinigung der Heißeite des Wärmeübertragers notwendig werden, woraus ggf. zusätzliche sehr geringe variable Betriebskosten entstehen können. In der folgenden Tabelle werden diese vernachlässigt.

Tab. 1-1 Techno-ökonomische Kenndaten von TEG

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Durchschnittliche Nennleistung	W	$<10^4$ -1.000	$<10^4$ -2.000	$<10^4$ -10.000	$<10^4$ -50.000	$<10^4$ -100.000
Lebensdauer	h	>22.000	>35.200	>44.000	>66.000	>88.000
Lebensdauer (@ 4.400 h/a)	a	5	8	>10	>15	>20
Wirkungsgrad ($\Delta T=200$ K)	%	5	7	8	11	13
Temperaturniveau	°C	25-900	25-900	25-900	25-900	25-900
Investition	€/kW	40.000-1.000	10.000-1.000	5.000-750	1.500-750	1.000-500
Variable Betriebskosten	€/ct/kWh	k. A., aufgrund der Wartungsfreiheit ist von 0 auszugehen				
Stromgestehungskosten	€/ct/kWh	182-4,5	28,4-2,8	11,4-2,3	2,3-1,1	1,1-0,9

Quelle: IZES (2016), Fraunhofer IPM (2016), BINE Informationsdienst (2014)

1.2 ORC-Prozess

Der ORC-(Organic Rankine Cycle)-Prozess ist ein thermodynamischer Kreisprozess, wie er in konventionellen Wasserdampfkraftwerken angewandt wird. Im Unterschied dazu wird dieser jedoch nicht mit Wasserdampf, sondern mit einem organischen Arbeitsfluid angetrieben. Meist wird ein Thermoölkreislauf durch die Wärmequelle erwärmt und diese Wärme an das Arbeitsfluid abgegeben. Dieses verdampft und treibt so eine Turbine, einen Schraubenverdichter oder eine Hubkolbenmaschine an.

Durch die Wahl eines organischen Arbeitsfluids wie beispielsweise Silikonöle, Kohlenwasserstoffe (Butan, Hexene, Pentan, Ethanol etc.) oder Kältemittel wie fluoridierte Kohlenwasserstoffe kann die Betriebstemperatur so weit herabgesetzt werden, dass die Verstromung von Abwärme bereits ab 85 °C möglich ist (Conpower 2017).

Dabei können derzeit elektrische Leistungen zwischen 5 kW (Enogia 2017) und 15 MW (Cryostar 2017) erzeugt werden. ORC-Anlagen werden meist zur Nutzung von Geothermie und in Biomassekraftwerken bzw. -KWK-Anlagen sowie bei solarthermischen Kraftwerken eingesetzt. Wasserdampfkreislaufprozesse können wegen der physikalischen Eigenschaften des Wassers bzw. des eher moderaten Temperaturni-

veaus der vorhandenen Abwärme nicht wirtschaftlich zur Abwärmeverstromung genutzt werden.

Abseits der industriellen Abwärmenutzung werden ORC-Anlagen von Siemens bereits als Technologie zur Stromerzeugung aus Abwärme auf Containerschiffen beispielsweise der dänischen Firma Maersk installiert. So kann deren Treibstoffverbrauch um bis zu zehn Prozent, die CO₂-Emissionen um bis zu zwölf Prozent reduziert werden (Siemens 2013; Stadtwerke Kempen 2017; Bosch KWK Systeme 2017) oder die Nachverstromung des Abgases von Biomasse Heizkraftwerken (STEAG New Energies 2017).

Die techno-ökonomischen Kenndaten von ORC-Anlagen sowohl von heute, als auch bis 2050 prognostiziert, werden in Tab. 1-2 dargestellt. Die Volllastbetriebsstunden für ORC-Anlagen werden mit 6.000 h/a angesetzt. Die Wirkungsgrade gelten für ORC Turbinen > 500 kW_{el} Leistung. Für die weiteren Expansionstechnologien (Schraubenverdichter, Hubkolbenmaschinen etc.) variieren die Wirkungsgrade je nach Temperaturniveau etwa zwischen 8 und 20 %. Das sinnvoll nutzbare Temperaturniveau liegt etwa zwischen 80 und 350 °C. Höhere Temperaturen können auch genutzt werden, jedoch gibt es in diesem Temperaturbereich eine zunehmende Konkurrenz zu konventionellen Wasserdampfkraftwerken.

Tab. 1-2 Techno-ökonomische Kenndaten von ORC-Anlagen

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Durchschnittliche Nennleistung (elektrisch)	kW	5-15.000	5-15.000	5-15.000	5-15.000	5-20.000
Lebensdauer (Turbinen)	h	>90.000	>90.000	>120.000	>120.000	>120.000
Lebensdauer (@ 6.000 h/a)	a	>15	>15	>20	>20	>20
Wirkungsgrad (Turbinen, $\Delta T=300$ K)	%	20	20	22	23	24
Temperaturniveau	°C	80-350	80-350	80-350	80-350	80-350
Investition	€/kW	8000-3000	6000-2500	4000-2000	2500-1500	1500-1000
Variable Betriebskosten	€/ct/kWh	2,5-2,0	2,0	2,0-1,5	2,0-1,5	1,5
Stromgestehungskosten	€/ct/kWh	11,4-6,4	9,8-5,3	5,3-3,2	4,1-2,8	2,8-2,3

Quelle: IZES (2016)

1.3 Kalina-Prozess

Ebenso wie der ORC-Prozess basiert der Kalina-Prozess auf dem Kreisprozess, welcher in Wasserdampfkraftwerken angewendet wird. Der Unterschied zu ORC-Prozessen und Wasserdampf-Kreisprozessen liegt im Arbeitsmedium. Beim Kalina-Prozess wird ein Ammoniak-Wasser-Gemisch als Arbeitsfluid verwendet. Dieses hat den Vorteil, dass die notwendige Verdampfung nicht isotherm stattfindet und sich somit ein Siedebereich und kein fester Siedepunkt einstellt, wodurch sich der elektrische Wirkungsgrad gegenüber einem ORC- und Wasserdampfprozess erhöht (Forschungszentrum Jülich 2017). Ein weiterer Vorteil der Verwendung eines Zwei-Stoff-

Gemisches ist die Möglichkeit der Anpassung des Mischungsverhältnisses an variable Abwärmemengen und -temperaturen. Durch die Einstellung eines Siedebereichs und möglicher variabler Temperaturen werden jedoch größere Wärmeübertragungsflächen benötigt, was den Investitionspreis erhöht (Wietschel et al., 2010, S. 876f). Ferner ist das enthaltene Ammoniak toxisch und korrosiv, wodurch die Komponenten einer Kalina-Anlage aus besonders hochwertigem Material aufgebaut werden müssen (beispielsweise hochlegierte Stähle oder Titan). Dadurch verteuern sich die Kosten für eine auf dem Kalina-Prozess basierende Anlage erheblich. Das Arbeitsmedium erfordert zusätzlich besondere Beachtung während des Betriebs und der Wartung einer Anlage, da dieses aufgrund der Toxizität nicht entweichen darf (IZES 2016).

Kalina-Anlagen arbeiten in einem Temperaturbereich zwischen 80 °C und 200 °C bei Leistungen ab 0,5 MW_{el} (IZES 2016).

Der Kalina-Prozess wurde aufgrund der Ölkrise der Siebzigerjahre von Alexander Kalina entwickelt. Nachdem dieser Prozess zur Nutzung von industrieller Abwärme im Niedertemperaturbereich vorgestellt wurde, stabilisierten sich die Ölpreise, und auch die Abwärmemengen konnten durch Prozessoptimierungen reduziert werden, wodurch der Kalina-Prozess auf dem Markt an Bedeutung verlor. Durch die Entwicklung von Geothermieranlagen gewinnt die Kalina-Technik jedoch wieder an Relevanz (Janzing 2004).

In Deutschland wurden dadurch bisher lediglich drei Anlagen installiert, welche nach dem Kalina-Prinzip im unteren Megawatt-Leistungsbereich arbeiten (Geothermie Unterhaching 2017; Enerchange 2017; EnBW Energie Baden-Württemberg 2017). Weltweit existieren weniger als zehn Anlagen (Wietschel et al. 2010: 875 f.).

Aufgrund der wenigen existierenden Anlagen, ist eine tabellarische Aufstellung der techno-ökonomischen Kenndaten nicht möglich. Aus gleichem Grund erfolgt auch nur eine eingeschränkte Beschreibung der Kriterien für Kalina-Anlagen.

2 Stand F&E in Deutschland

2.1 Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren sind derzeit als Wismuttelluride (BiTe), welche bereits im Kilogramm-Maßstab erhältlich sind (Fraunhofer IPM 2016), für Temperaturen $< 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ und für elektrische Leistungen bis 40 Watt vereinzelt am Markt verfügbar (Wietschel et al. 2010: 865). Deren Wirkungsgrad beträgt bis zu 5 % (Fraunhofer IPM 2016). Durch Segmentieren von Modulen, bei denen beispielsweise Wismuttelluride und Bleitelluride kombiniert werden, können bisweilen höhere Wirkungsgrade bei Temperaturen bis $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ erzielt werden. Aufgrund der Giftigkeit von Bleitellurid wird jedoch nach Alternativen in der Materialauswahl geforscht. Derzeit betrifft dies besonders Materialien wie Skutterudite, Halb-Heusler-Verbindungen, Silizide sowie modifizierte BiTe-Module, die eine erweiterte Temperaturstabilität haben. Silizide sind ungiftig, stehen jedoch noch vor thermoelektrischen und mechanischen Herausforderungen. Insbesondere müssen die Eigenschaften der n- und p-Halbleiter noch besser aufeinander abgestimmt werden. Halb-Heusler-Module und Skutterudite hingegen sind bereits im Kilogramm-Maßstab erhältlich, wobei Skutterudite höhere Güteziffern erreichen. Andererseits haben Halb-Heusler-Module eine höhere chemische sowie mechanische Stabilität (Fraunhofer IPM 2016). In Laborversuchen konnte bereits eine Gütezahl von 1,2 realisiert werden (Bartholomé und Fraunhofer 2013). Eine Kaskadierung unter Kombination von Nieder- und Hochtemperaturmaterialien kann die Effizienz eines Thermoelektrischen Moduls derzeit in Laborversuchen auf bis zu 20 % erhöhen (Fraunhofer IPM 2016).

Bei Fraunhofer konnte erstmals eine geeignete Löttechnik zur Verbindung der elektrischen Kontakte erarbeitet werden, welche den erforderlichen hohen Temperaturunterschieden standhalten, langlebig sind und gleichzeitig einen niedrigen elektrischen Widerstand haben (Bartholomé und Fraunhofer 2013).

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt stellen nanostrukturierte Materialien dar. An der Universität Duisburg-Essen wird derzeit beispielsweise an der Herstellung Thermoelektrischer Generatoren aus nanokristallinem Silizium geforscht, wodurch im Erfolgsfall nicht nur giftige Materialien wie Blei und Tellur ersetzt werden könnten, sondern auch der Wirkungsgrad der TEG gesteigert werden würde (Universität Duisburg-Essen 2015).

Anwendung im Abwärmebereich finden TEG derzeit nur vereinzelt, beispielsweise in den Raumsonden Voyager 1 und 2. Dort erzeugen diese bereits seit mehreren Jahrzehnten aus der Abwärme der Radioisotopenbatterien an Bord elektrische Energie (Fraunhofer IPM 2016). Zukünftig soll die Thermoelektrik vor allem in der Automobilindustrie Anwendung finden. In Testfahrzeugen konnte durch die Umwandlung der Abgaswärme in elektrische Energie eine Treibstoffeinsparung von fast vier Prozent erreicht werden sowie eine CO_2 -Ersparnis von 9,6 g/km (Siemens 2013: 65). BMW berichtet von Treibstoffeinsparungen von bis zu fünf Prozent (Frick 2012). Weitere interessante Anwendungsfälle für TEG sind die Nutzung von BHKW-Abwärme, siehe dazu beispielsweise Fraunhofer IPM (2017), sowie der Einsatz in der Stahlindustrie, siehe dazu beispielsweise Ebling (2017) und EnEff: Industrie (2015).

2.2 ORC-Prozess

ORC-Anlagen sind die am weitesten entwickelte Technologie zur Stromerzeugung aus Abwärme. Sie können mit Wirkungsgraden zwischen 10 % und 18 % (Forschungszentrum Jülich GmbH, 2017), elektrischen Leistungen von 5 kW (Enogia 2017) bis 15 MW (Cryostar 2017), in Temperaturbereichen zwischen 85 °C (Conpower 2017) und 530 °C (Trigon 2016) installiert werden, siehe dazu Tab. 1-2. Demnach decken ORC-Anlagen bereits einen sehr großen Leistungs- und auch Temperaturbereich ab. Noch 2009 wurden ORC-Anlagen erst ab einer Leistung von 300 kW installiert (Wietschel et al. 2010: 874). Derzeit gelten ORC-Anlagen in unteren Leistungsbereichen noch als unwirtschaftlich (Forschungszentrum Jülich 2017). In Deutschland werden bei orcan Energy derzeit ORC-Module in der Leistungsklasse 20 kW elektrische Nettoleistung entwickelt (Orcan Energy 2017).

Die allgemeine Forschung, wie beispielsweise im Forschungsprojekt ORCent, konzentriert sich weitestgehend auf die Entwicklung neuer Wärmeübertrager, Arbeitsmittel und Expander (TIB Hannover 2017).

2.3 Kalina-Prozess

Kalina-Anlagen sind weitestgehend aus der Forschung und Entwicklung verdrängt. Erst langsam scheint das Interesse an dieser Technologie zuzunehmen (vgl. Kapitel 1.3), sodass der Bau von Demonstrationsanlagen möglich wird. Installierte Anlagen wurden im Temperaturbereich zwischen 80 °C und 200 °C errichtet. Ihr Leistungsbereich beginnt bei etwa 0,5 MW (IZES 2016).

3 Relevanz öffentlicher Förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren sind derzeit lediglich im Niedertemperaturbereich ($< 250\text{ °C}$) und für kleine Leistungen kommerziell erhältlich (IZES gGmbH, 2016). Die im Temperaturbereich zwischen 200 °C und 500 °C eingesetzten Bleitelluride sind zwar ebenfalls bereits teilweise kommerziell erhältlich, jedoch ist es aus ökologischen Gründen für eine breite Anwendung erforderlich, Blei zu substituieren. Skutterudite, Silizide und Halb-Heusler-Legierungen könnten Bleitelluride ersetzen, befinden sich derzeit jedoch noch im Forschungs-, Prototyp- und Einzelanfertigungsstadium (Wietschel et al. 2010: 877). Hier sind vor allem preisliche Risiken zu beachten, die eine breite Markteinführung und Kommerzialisierung behindern. Derzeit ist eine Investition von bis zu 400 €/W erforderlich (IZES 2016). Des Weiteren sollte der ZT-Wert als Effizienzindikator mindestens 1,5 (derzeit im Durchschnitt rund 1,0) über alle Temperaturbereiche betragen, damit eine wirtschaftliche Verstromung von Abwärme und somit eine Kommerzialisierung möglich ist. Eine Massenproduktion von Thermoelektrischen Generatoren mit diesen Eigenschaften wird frühestens 2023 erwartet (König 2009).

Daher ergibt sich für die kommerzielle Markteinführung der Thermoelektrik in allen Temperaturbereichen eine Vorlaufzeit von bis zu 10 Jahren, siehe dazu Tab. 3-1. Thermoelektrische Generatoren für kleine elektrische Leistungen im Niedertemperaturbereich sind in dieser Betrachtung ausgeschlossen, da diese bereits kommerziell verfügbar sind.

Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung Thermoelektrischer Generatoren

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>

ORC-Prozess

Die ORC-Technologie ist im Bereich der Stromerzeugung aus Abwärme bereits kommerziell verfügbar. Bislang wurden rund 180 ORC-Anlagen zur Abwärmenutzung in einem Leistungsbereich von 5 kW_{el} bis $7.500\text{ kW}_{\text{el}}$ vor allem für Temperaturen zwischen 80 °C und 300 °C installiert. ORC-Anlagen im niedrigen Leistungsbereich zwischen 20 kW_{el} und 60 kW_{el} befinden sich in den Industriezweigen der Metallverarbeitung, Glasherstellung und in der Landwirtschaft im Probebetrieb. Jedoch sind auch diese bereits in serienreifer Ausführung am Markt erhältlich (ORC-Fachverband 2017; Orcan Energy 2017). Daher ergibt sich für ORC-Anlagen keine Vorlaufzeit bis zur ersten kommerziell erhältlichen Anlage (s. dazu Tab. 3-2).

Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von ORC-Anlagen

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>

Kalina-Prozess

Der Kalina-Prozess wurde erstmals in den 1990er Jahren von der Firma Ebara in Japan umgesetzt, die erste Anlage in Deutschland wurde im Februar 2009 in Unterhaching installiert. Derzeit ist aufgrund des eher mäßigen Interesses an dieser Technologie die Vorlaufzeit bis zur Kommerzialisierung nicht seriös bestimmbar.

Tab. 3-3 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Kalina-Anlagen

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme befinden sich allgemein in jedem Entwicklungsstadium von der Technologieentwicklung (TRL 2) bis zum kommerziellen Systemeinsatz (TRL 9). Dies liegt vor allem daran, dass TEG durch verschiedene Materialeinsätze (siehe hierzu Kapitel 1.1 und 3.1), welche verschiedene Temperaturbereiche bzw. Anwendungsbereiche abdecken sollen, untersucht und eingesetzt werden. Beispielsweise können Materialien auf nanostrukturierter Basis (wie beispielsweise nanokristallines Silizium), Skutterudite und Halb-Heusler-Legierungen durch Funktionsnachweise und Demonstrationsanlagen ihre grundsätzliche Funktionstüchtigkeit bereits unter Beweis stellen, werden jedoch zur Erhöhung des Wirkungsgrades und Verbesserung der Eigenschaften weiterentwickelt (vgl. Kapitel 2.1). Lediglich Wismuttelluride sowie Bleitelluride, welche es aufgrund der Toxizität zu ersetzen gilt, sind bereits kommerziell verfügbar. Noch 2014 befanden sich TEG, welche nicht mit direktem Kontakt arbeiten, sondern auch Strahlungswärme umwandeln können, in der Ideenfindung (Universität Duisburg-Essen 2014). 2015 berichtet die Plattform EnEff: Industrie bereits von Laborversuchen und Demonstrationsanlagen, welche sich mit der Nutzung von Strahlungsabwärme, vor allem in der Stahlindustrie befassen (EnEff: Industrie 2015).

ORC-Anlagen werden, wie in Kapitel 3.1 bereits beschrieben, lediglich auf Basis des Kreislaufprozesses von Wasserdampfkraftwerken weiterentwickelt. Hauptsächlich wird, wie das Verbundprojekt ORCent der DeVetec GmbH, Steag New Energies und

Evonik Industries AG zeigt, nach neuen Arbeitsfluiden, Motoren und Wärmeübertragern (bzw. geeigneten und/oder optimierten Materialien für Wärmeübertrager) geforscht (TIB Hannover 2017). Daher befinden sich ORC-Anlagen bereits in höheren Entwicklungsstadien bzw. sind kommerziell verfügbar.

Kalina-Anlagen werden derzeit kaum weiterentwickelt bzw. erforscht. Weltweit wurden seit den 1990er Jahren nur wenige Anlagen errichtet, welche teilweise bis heute in Betrieb sind, wodurch lediglich von Anlagen mit Demonstrationscharakter gesprochen werden kann. Kalina-Anlagen zur Stromerzeugung aus Abwärme sind nur in Japan bekannt (Wietschel et al. 2010: 875 f.).

Tab. 3-4 Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TEG	ORC	Kalina
Grundlagenforschung				
	TRL 1 - Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 - Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 - Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 - Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 - Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 8 - Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kommerzialisierung				
	TRL 9 - Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren sind aufgrund ihrer bisher geringen Wirkungsgrade von 5-8 % (und niedrigen ZT-Werten) einem hohen technischen Risiko ausgesetzt.

Es ist von erheblicher Bedeutung, dass geeignete Materialien zur thermoelektrischen Nutzung erforscht werden und TEG auf diese Weise vor allem auch in höheren Leistungsklassen und Temperaturbereichen zur Verfügung gestellt werden. Außerdem mangelt es derzeit noch an Möglichkeiten einer automatisierten bzw. standardisierten Herstellung (Wietschel et al. 2010: 881), wodurch sich der Preis einzelner Module erheblich verteuert. Beispielsweise wird bei Fraunhofer IPM in Freiburg derzeit an einer automatisierten Produktionstechnologie gearbeitet. Für die derzeit in der Erforschung befindlichen Materialien auf nanostrukturierter Basis, Skutterudite und Halb-Heusler-Legierungen muss die Zyklen- und Temperaturstabilität noch nachgewiesen bzw. bestätigt werden. Aus den genannten Gründen ergeben sich daher für Thermoelektrische Generatoren sowohl in wirtschaftlicher als auch in technischer Hinsicht hohe Forschungs- und Entwicklungsrisiken.

Tab. 3-5 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken bei Thermoelektrischen Generatoren

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

ORC-Prozess

ORC-Anlagen werden kaum neu entwickelt, sondern die bereits bewährte Wasserdampfprozess-technik auf den jeweiligen Anwendungsfall, hier die Stromerzeugung aus Abwärme, angepasst und optimiert. Insgesamt erreichen ORC-Anlagen im Abwärmebereich einen Wirkungsgrad von bis zu 24 % im Hoch- und von 10 % im Niedertemperaturbereich (GETEC heat&power 2017). Forschungsaktivitäten sind hauptsächlich auf dem Gebiet der eingesetzten Fluide sowie der Wärmeübertrager festzustellen, beispielsweise in dem Verbundprojekt ORCent, in dem gleich mehrere Fluide identifiziert, entwickelt und getestet wurden (TIB Hannover 2017). Dadurch, dass die verwendete Technik aus mehreren Einzelkomponenten (Wärmeübertrager, Turbine, Hubkolben- oder Schraubenexpander sowie Generator) besteht, und durch die vergleichsweise geringeren Forschungsaktivitäten in diesen Bereichen ist das technische Entwicklungsrisiko, wie in Tab. 3-6 dargestellt, als eher hoch einzustufen. Vor allem bei der Nutzung der Abwärme in Abgasen spielen die Qualität des Abgases und die Robustheit der verwendeten Einzelkomponenten eine entscheidende Rolle, wodurch häufig auf teure Materialien zurückgegriffen werden muss (Ormatic 2017). Aufgrund der bisher hohen Kosten der Gesamtanlage, der moderaten Energiepreise und der langfristigen Abhängigkeit von Qualität und Verfügbarkeit des Abgases ist das wirtschaftliche Risiko als hoch einzustufen, siehe Tab. 3-6. Die Abgasqualität wirkt sich zudem direkt auf Wartungsarbeiten und damit Unterhaltungskosten aus. Dennoch tragen ORC-Anlagen zur Nutzung von bisher als nicht wirtschaftlich nutzbare Wärmeenergie bei und können somit den individuellen Strombezug in Industriebetrieben senken (Eisebraun 2013: 21).

Tab. 3-6 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken bei ORC-Anlagen

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kalina-Prozess

Die technischen sowie wirtschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsrisiken werden als eine Stufe höher als beim ORC-Prozess abgeschätzt. Demnach wird, aufgrund der erst wenigen installierten Anlagen, das technische Entwicklungsrisiko als hoch eingestuft. Da Kalina-Anlagen durch die Notwendigkeit der größeren Wärmeübertragungsfläche ein höheres Investitionsvolumen haben, ist das wirtschaftliche Risiko nicht als hoch, sondern als sehr hoch einzustufen. Zur Senkung dieser beiden Risiken ist vor allem die Materialforschung von hoher Bedeutung.

Tab. 3-7 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken bei Kalina-Anlagen

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Tab. 3-8 zeigt die verwendeten kritischen Rohstoffe der betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme (TEG, ORC- und Kalina-Anlagen). Aufgeführt sind lediglich diejenigen Rohstoffe, welche nach der DERA-Rohstoffliste 2014 als Rohstoffe mit hohem Risiko bewertet werden. Die Arbeitsfluide von ORC- und Kalina-Anlagen werden hier nicht betrachtet, da überwiegend Kohlenwasserstoffe bzw. Ammoniak und Wasser eingesetzt werden. Außerdem werden aufgrund zukünftiger Beschränkungen die heute eingesetzten Halogenkohlenwasserstoffe durch andere Fluide wie beispielsweise Ethanol ersetzt. Alle betrachteten Rohstoffe sind rezyklierbar. Informationen über Substitutionsmöglichkeiten konnten nicht gefunden werden. Einzig bei der Verwendung von Blei in Thermoelektrischen Generatoren ist aufgrund der Toxizität des Elements ein Substitutionsbestreben bekannt. Um die Verwendung von Bleitelluriden zu vermeiden, werden derzeit Skutterudite, Silizide und Halb-Heusler-Legierungen entwickelt und erforscht (vgl. Kapitel o).

Tab. 3-8 Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme

Kritischer Rohstoff	Substitutionsmöglichkeit	Rezyklierbarkeit
TEG		
Cobalt		Ja ⁱ
Antimon		Ja ⁱ
Zinn	Es sind noch keine Informationen zu Substitutionsmöglichkeiten der Materialien in Thermoelektrischen Generatoren vorhanden	Ja ⁱ
Blei		Ja ⁱ
Germanium		Ja ⁱ
Magnesium		Ja ⁱⁱ
Silizium		ja ^{i ii}
ORC/Kalina		
Wolfram	Es sind noch keine Informationen zu Substitutionsmöglichkeiten der Materialien in ORC-/Kalina-Anlagen vorhanden	Ja ^{iv}
Cobalt		Ja ⁱ
Vanadium		Ja ^v

Quelle: ⁱ umicore (2014), ⁱⁱ international magnesium association (2017), ⁱⁱⁱ Kempkens (2013), ^{iv} Deutsche Rohstoffagentur DERA (2013), ^v innova recycling (2017)

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Das Gesamtpotenzial der zur Verfügung stehenden Abwärme für das Technologiefeld wird in TWh angegeben. Für die ausgewählten Einzeltechnologien TEG und ORC wird daraus ein Marktpotenzial abgeleitet. Diese Angaben werden jeweils in TWh und zusätzlich in GW installierter Leistung sowie sowohl in kumulierter als auch in Form von Potenzialen je Zeitscheibe angegeben.

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

Das globale Gesamtabwärmepotenzial wird unter Zuhilfenahme der folgenden Studien, Statistiken und Annahmen abgeschätzt:

- BMWi Energiedaten: Gesamtausgabe, Stand: Februar 2017 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017)
- Abwärmeatlas Deutschland (FKZ 03ET1208 A bis C) (Fraunhofer IPM 2016)

Die angegebenen industriellen Abwärmepotenziale beziehen sich auf den Endenergieverbrauch. An dieser Stelle muss jedoch angemerkt werden, dass die folgenden Abschätzungen lediglich dazu dienen, die Größenordnung des vorhandenen globalen und des nationalen Abwärmepotenzials zu bestimmen, bzw. dass die gemachten Angaben deshalb einer gewissen Unschärfe unterliegen. Diese Unschärfe beinhaltet insbesondere den ggf. notwendigen Ersatzbedarf bzw. den Wegfall aufgrund von Effizienzmaßnahmen und/oder Prozessänderungen.

In Deutschland beträgt der Faktor zwischen Primärenergie (PE) und Endenergie (EE) etwa 0,67. Vom gesamten Endenergieverbrauch entfallen etwa 29 % auf den Industriesektor. Im Rahmen der Bearbeitung des Verbundvorhabens „Abwärmeatlas“ wurde das nutzbare Abwärmepotenzial in der deutschen Industrie, unabhängig von Temperaturniveau und temporärer Verfügbarkeit, auf rund 35 % der in der Industrie eingesetzten EE abgeschätzt (siehe IZES 2016). Diese Faktoren wurden auf das international nutzbare Abwärmepotenzial übertragen. Der globale Primärenergieverbrauch wurde den Angaben der International Energy Agency entnommen (International Energy Agency 2017). Große Teile des heute vorhandenen Potenzials werden zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit im Rahmen von Prozessoptimierungen genutzt und/oder durch den Einsatz von effizienteren Geräten/Anlagen gemindert. Diese Annahme ist in der moderaten Steigerung des globalen Endenergieverbrauchs von 2 %/a im Industriesektor berücksichtigt.

Mit diesen Faktoren wurde das nachfolgend angegebene global nutzbare industrielle Abwärmepotenzial berechnet. Die Werte für das minimale bzw. maximale Potenzial entsprechen ± 5 % des berechneten Potenzials. Hier ist zu beachten, dass bewusst auf die Auf- oder Abrundung der berechneten Werte verzichtet wurde und deshalb die Angaben eine höhere Genauigkeit vortäuschen als tatsächlich vorhanden ist.

Tab. 4-1 Analyse des globalen industriellen Abwärmepotenzials für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in TWh_{th}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	TWh		TWh		TWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	11.619	12.842	10.457	11.558	9295	10.274
2030	14.164	15.655	12.747	14.089	11.331	12.524
2040	17.265	19.228	15.539	17.305	13.812	15.383
2050	21.046	23.262	18.942	20.936	16.837	18.610

Ausgehend von diesen Basisdaten wird nachfolgend das nutzbare globale Abwärmepotenzial auf die Einzeltechnologien TEG und ORC-Anlagen übertragen. Hier wird der Tatsache Rechnung getragen, dass große Teile der verfügbaren Abwärme im Temperaturbereich < 250 °C vorliegen und somit (derzeit) zur Erzeugung von Strom weniger gut geeignet sind. Eine in der Zukunft zunehmende Nutzung dieses Temperaturniveaus zur Stromerzeugung wird jedoch durch Erhöhung des prozentual zur Verfügung stehenden Anteils berücksichtigt.

Die Nutzung *Thermoelektrischer Generatoren* im industriellen Großeinsatz wurde mit Stand 2015 noch nicht untersucht (EnEff: Industrie 2015). Deshalb wurde bei der Abschätzung des globalen Marktpotenzials für TEG für das Jahr 2020 von keiner bzw. einer sehr geringen Nutzung dieser Technologie ausgegangen bzw. auf 0 gesetzt. Die Abschätzungen für das BAU-Szenario wurden unter folgenden Annahmen durchgeführt: 2030 werden in BAU-Szenario von TEG maximal 30 % (2040: 40 % / 2050: 50 %) des vorhandenen industriellen Abwärmepotenzials für die Produktion von Strom genutzt. Davon werden 10 % (20 % / 35 %) auch tatsächlich umgesetzt. Für die durchschnittlichen Wirkungsgrade der TEG wurden 8 % (11 % / 13 %) angenommen. Zur Berechnung der Leistung wurde eine Volllastbetriebsstundenzahl von 4.400 h/a angenommen. Das „2 °C“ bzw. „besser 2 °C“-Szenario geht von einer um 10 % bzw. 30 % erhöhten Nutzung der Technologie aus. Tab. 4-2 und Tab. 4-3 beziffern das globale kumulierte Abwärmepotenzial, jeweils für die beim Einsatz von TEG zu erwartende elektrische Energiemenge und für die daraus berechnete Leistung.

Tab. 4-2 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in TWh_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	TWh		TWh		TWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	0	0	0	0	0	0
2030	34	38	37	41	44	49
2040	152	169	167	186	198	220
2050	479	529	527	582	622	688

Tab. 4-3 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in GW_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	GW		GW		GW	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	0	0	0	0	0	0
2030	8	9	8	9	10	11
2040	35	38	38	42	45	50
2050	109	120	120	132	141	156

Tab. 4-4 und Tab. 4-5 beziffern die beim Einsatz von TEG pro Zeitscheibe zu erwartende elektrische Energiemenge und die daraus berechnete Leistung.

Tab. 4-4 Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in TWh_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	TWh		TWh		TWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2030	34	38	37	41	44	49
2031-2040	118	132	130	145	153	171
2041-2050	327	360	360	396	425	468

Tab. 4-5 Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in GW_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	GW		GW		GW	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2030	8	9	8	9	10	11
2031-2040	27	30	29	33	35	39
2041-2050	74	82	82	90	97	106

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen der Technologien TEG und ORC an die Abwärmequelle werden hier im Gegensatz zu TEG abweichende maximale Potenziale angenommen. Die Abschätzung des globalen Potenzials für ORC-Anlagen im BAU-Szenario wurde unter den folgenden Annahmen durchgeführt: 2020 werden von ORC-Anlagen im BAU-Szenario maximal 40 % (2030: 50 % / 2040: 60 % / 2050: 70 %) des vorhandenen Abwärmepotenzials für die Produktion von Strom genutzt. Davon werden 10 % (20 % / 25 % / 50 %) auch tatsächlich umgesetzt. Als Wirkungsgrade wurden 13 % (16 % / 19 % / 22 %) angesetzt. Zur Berechnung der installierten elektrischen Leistung wurde eine Vollastbetriebsstundenzahl von 6.000 h/a angenommen. Das „2 °C“ bzw. „besser 2 °C“-Szenario geht von einer um 10 % bzw. 30 % erhöhten Nutzung der Technologie aus. Tab. 4-6 und Tab. 4-7 beziffern das globale kumulierte Abwärmepotenzial, jeweils für die durch Anwendung der ORC-Technologie zu erwartende elektrische Energiemenge und für die daraus berechnete Leistung.

Tab. 4-6 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in TWh_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	TWh		TWh		TWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	60	67	66	73	79	87
2030	227	250	249	276	295	326
2040	689	767	758	844	896	997
2050	1621	1791	1783	1970	2107	2329

Tab. 4-7 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in GW_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	GW		GW		GW	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	10	11	11	12	13	14
2030	38	42	42	46	49	54
2040	115	128	126	141	149	166
2050	270	299	297	328	351	388

Tab. 4-8 und Tab. 4-9 beziffern die beim Einsatz von ORC-Anlagen pro Zeitscheibe zu erwartende elektrische Energiemenge und die daraus berechnete Leistung.

Tab. 4-8 Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in TWh_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	TWh		TWh		TWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	60	67	66	73	79	87
2021-2030	166	184	183	202	216	239
2031-2040	462	517	508	568	601	672
2041-2050	932	1024	1025	1126	1211	1331

Tab. 4-9 Globales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in GW_{el}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
	GW		GW		GW	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	10	11	11	12	13	14
2021-2030	28	31	30	34	36	40
2031-2040	77	86	85	95	100	112
2041-2050	155	171	171	188	202	222

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

Die Abschätzung des nationalen Abwärmepotenzials wurde auf der Grundlage der Ergebnisse des Verbundvorhabens Abwärmeatlas durchgeführt (IZES 2016). Die Werte für das minimale bzw. maximale Potenzial entsprechen auch im nationalen Szenario -/+ 5 % des berechneten Potenzials. Ebenso wie die globalen Potenziale unterliegt auch die Abschätzung des nationalen Potenzials einer gewissen Unschärfe, welche auch hier den ggf. notwendigen Ersatzbedarf bzw. den Wegfall aufgrund von Effizienzmaßnahmen und/oder Prozessänderungen beinhaltet. Folgende Tab. 4-10 gibt einen Überblick bezüglich des dort bestimmten gesamten verfügbaren Abwärmepotenzials in Deutschland.

Tab. 4-10 Analyse des nationalen industriellen Abwärmepotenzials für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in TWh_{th}

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	TWh _{th}		TWh _{th}		TWh _{th}	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	218	241	196	217	174	193
2030	206	228	186	205	165	182
2040	199	220	179	198	159	176
2050	194	214	174	193	155	171

Ausgehend von diesen Daten wird nachfolgend das nutzbare nationale Abwärmepotenzial auf die Einzeltechnologien TEG und ORC-Anlagen übertragen. Die Berechnungen werden mit denselben Annahmen bzw. derselben Systematik wie bei der Bestimmung des globalen Marktpotenzials durchgeführt. Auch hier wird der Tatsache Rechnung getragen, dass große Teile der verfügbaren Abwärme im Temperaturbereich < 250 °C vorhanden sind und somit (derzeit) zur Erzeugung von elektrischer Energie weniger gut geeignet ist, jedoch in der Zukunft mit einer zunehmenden Nut-

zung dieses Temperaturniveaus zur Stromerzeugung zu rechnen ist. Die folgenden Tabellen geben einen entsprechenden Überblick für die beiden Technologien Thermoelektrische Generatoren (Tab. 4-11 - Tab. 4-14) und ORC-Anlagen (Tab. 4-15 - Tab. 4-18).

Tab. 4-11 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in GWh_{el}

	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GWh		GWh		GWh	
Einheit						
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	0	0	0	0	0	0
2030	495	547	544	601	643	711
2040	1748	1932	1923	2125	2272	2511
2050	4408	4872	4849	5359	5730	6333

Tab. 4-12 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für Thermoelektrische Generatoren in MW

	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	MW		MW		MW	
Einheit						
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	0	0	0	0	0	0
2030	112	124	124	137	146	162
2040	397	439	437	483	516	571
2050	1002	1107	1102	1218	1302	1439

Tab. 4-13 Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in GWh

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GWh		GWh		GWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2030	495	547	544	601	643	711
2031-2040	1253	1385	1378	1524	1629	1801
2041-2050	2660	2940	2926	3234	3458	3822

Tab. 4-14 Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für Thermoelektrische Generatoren in MW

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	MW		MW		MW	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	0	0	0	0	0	0
2021-2030	112	124	124	137	146	162
2031-2040	285	315	313	346	370	409
2041-2050	605	668	665	735	786	869

Tab. 4-15 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in GWh

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GWh		GWh		GWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	1133	1252	1246	1378	1473	1628
2030	3298	3645	3628	4009	4287	4738
2040	7925	8759	8717	9635	10.302	11.387
2050	14.919	16.489	16.410	18.138	19.394	21.436

Tab. 4-16 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für ORC-Anlagen in MW

Referenz (BAU)			Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
Einheit	MW		MW		MW	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	189	209	208	230	246	271
2030	550	607	605	668	715	790
2040	1321	1460	1453	1606	1717	1898
2050	2486	2748	2735	3023	3232	3573

Tab. 4-17 Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in GWh

Referenz (BAU)			Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
Einheit	GWh		GWh		GWh	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	1133	1252	1246	1378	1473	1628
2021-2030	2165	2393	2381	2632	2814	3110
2031-2040	4627	5114	5090	5626	6015	6648
2041-2050	6994	7730	7693	8503	9092	10.049

Tab. 4-18 Nationales Marktpotenzial je Zeitscheibe für ORC-Anlagen in MW

Referenz (BAU)			Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
Einheit	MW		MW		MW	
Jahr	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	189	209	208	230	246	271
2021-2030	361	399	397	439	469	518
2031-2040	771	852	848	938	1003	1108
2041-2050	1166	1288	1282	1417	1515	1675

Verifizierung der implizierten nationalen und internationalen Wachstumsraten

Die Verifizierung der ermittelten Marktpotenziale erfolgt mittels der Berechnung der mittleren jährlichen Wachstumsraten nach $CAGR = (N(t')/N(t))^{(1/(t'-t))} - 1$

mit $N(t)$ = Anzahl der Neuzulassungen zum Zeitpunkt t

$N(t')$ = Anzahl der Neuzulassungen zum Zeitpunkt t'

t = Anfangsjahr

t' = Endjahr.

Für die betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme konnte weder national noch international eine konkrete Anzahl der bisher installierten Anlagen ermittelt werden. Zur Berechnung der Wachstumsraten wurde nicht die Anzahl der Neuanlagen eingesetzt, sondern das zuvor berechnete Zuwachspotenzial an produzierter elektrischer Energie (vgl. Tab. 4-4 und Tab. 4-8 (international) sowie Tab. 4-13 und Tab. 4-17 (national)). Zusätzlich zu den in Tab. 4-19 dargestellten Wachstumsraten wurden die mittleren jährlichen Wachstumsraten pro Zeitscheibe für die Technologien TEG und ORC-Anlagen berechnet. Der Kalina-Prozess wird bei dieser Betrachtung aufgrund der geringen nationalen und internationalen Forschungs- und Demonstrationsaktivitäten nicht betrachtet.

Da für TEG bis 2020 keinerlei Potenziale zu erwarten sind, kann für die Entwicklung bis 2030 keine Wachstumsrate angegeben werden. In der Zeitscheibe 2030 bis 2040 erreichen sie national eine jährliche mittlere Wachstumsrate von rund 10 % und in der darauffolgenden Zeitscheibe bis zum Jahr 2050 von rund 8 %. International ergibt sich zwischen 2030 und 2040 eine jährliche mittlere Wachstumsrate von 13 %, in den darauffolgenden zehn Jahren von 11 %. Diese Wachstumsraten gelten nicht nur für das BAU-Szenario, sondern für alle Szenarien (1: BAU, 2: 2 °C/80 %, 3: besser 2 °C/95 %). Für die Energiepotenziale wurde im Szenario 2 generell ein um 10 %, in Szenario 3 ein um 30 % höheres Potenzial angenommen als in Szenario 1. Daher ist die konstante Wachstumsrate über alle Szenarien plausibel. Dennoch ist zu beachten, dass die in Tab. 4-4 (internationales Zuwachspotenzial) sowie in Tab. 4-13 (nationales Zuwachspotenzial) dargestellten absoluten Potenziale aufgrund des höheren Basispotenzials für die Szenarien 2 und 3 deutlich höher sind, als im BAU-Szenario.

Gleiches gilt für die über die Szenarien konstante Entwicklung des Zuwachspotenzials für ORC-Anlagen. Dieses ist in den Tab. 4-8 und Tab. 4-17 dargestellt. Die jährliche mittlere nationale Wachstumsrate beträgt zwischen den Jahren 2020 und 2030 7 %, zwischen 2030 und 2040 8 % und zwischen 2040 und 2050 4 %. International beträgt diese zwischen 2020 und 2040 11 % und zwischen 2040 und 2050 7 %. Damit sind die Wachstumsraten der betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme als gering einzustufen. Übliche Wachstumsraten für neue Technologien betragen zwischen 10 % und 30 %. Diese steigen über die Zeit zunächst exponentiell an, da die Nachfrage für neue Technologien für gewöhnlich zu Beginn sehr gering ist. Nach überzeugender Demonstration und Markteinführung sowie Ausstattung der Unternehmen nimmt die Wachstumsrate jedoch wieder ab. Da dieser Trend in den implizierten Zuwachsraten von ORC-Anlagen und ansatzweise auch für TEG

zu erkennen ist, kann von realistischen Angaben der Marktentwicklung bis 2050 ausgegangen werden.

Tab. 4-19 Ermittlung Wachstumsrate für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme

Technologie	Zeitraum	CAGR
Thermoelektrische Generatoren	2030 national	10 %
	(2030,2050) national	9 %
	2030 global	15 %
	(2030,2050) global	13 %
ORC-Anlagen	(2014,2050) national	6 %
	(2014,2050) global	11 %

In Tab. 4-20 erfolgt die Monetarisierung des Marktpotenzials. Die angegebenen Beträge leiten sich ab aus den in Tab. 1-1 und Tab. 1-2 angegebenen Investitionen. Die zugrunde gelegten Potenziale sind Tab. 4-5, Tab. 4-9, Tab. 4-14 und Tab. 4-18 entnommen.

Tab. 4-20 Monetarisierung des Marktpotenzials

Jahr	International				National			
	Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Mrd. € _{2015/a}		Mrd. € _{2015/a}		Mrd. € _{2015/a}		Mrd. € _{2015/a}	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	33	86	39	101	0,6	1,6	0,7	1,9
2021-2030	69	182	82	214	0,9	2,4	1,1	2,9
2031-2040	149	286	176	338	1,5	2,9	1,8	3,4
2041-2050	232	372	274	439	1,8	2,9	2,1	3,4

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen

Teilkriterium 4.1 Vermiedene Treibhausgasemissionen

Zur Bestimmung der vermiedenen Treibhausgasemissionen aufgrund des Einsatzes der betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus industrieller Abwärme wird als Referenztechnologie der Deutsche Strommix angesetzt bzw. wird auf dessen Emissionsfaktor bezüglich der CO₂-Emissionen je kWh zurückgegriffen. Bei der Nutzung von Abwärmepotenzialen kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass durch die Erzeugung von elektrischer Energie aus sonst ungenutzter Abwärme die

dementsprechende Menge Strom nicht mehr aus dem Netz bezogen werden muss. Dabei werden für den Referenzfall die energiebezogenen CO₂-Emissionen, basierend auf den Daten des Umweltbundesamts, ab 2015 jährlich um 1,5 % und ab 2040 jährlich um 3 % abgesenkt (Umweltbundesamt 2017). Die so generierten Daten entsprechen in etwa dem derzeitigen Trend nach (Henning 2013: 8). Für das 80 %- und das 95 %-Szenario werden die Emissionswerte bis 2050 nochmals um 1,5 % jährlich und für das 95 %-Szenario ab 2040 zusätzlich nochmals um 2 % jährlich abgesenkt. Tab. 4-21 bis Tab. 4-24 zeigen die mittels der beschriebenen Annahmen berechneten vermiedenen CO₂-Emissionen gemeinsam für beide betrachteten Technologien sowie für die Einzeltechnologien TEG und ORC. An dieser Stelle werden die vermiedenen Emissionen im Bezugsjahr dargestellt, nicht die kumulierten vermiedenen Emissionen bis zum Bezugsjahr.

Tab. 4-21 Jährlich vermiedene THG-Emissionen durch Nutzung der Technologien TEG und ORC des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	0,59 – 0,65	0,70 – 0,77
2030	1,46 – 1,61	1,72 – 1,91
2040	2,74 – 3,03	3,24 – 3,58
2050	4,04 – 4,47	3,88 – 4,29

Tab. 4-22 Jährlich vermiedene THG-Emissionen durch Nutzung von TEG zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	0	0
2030	0,19 – 0,21	0,23 – 0,25
2040	0,50 – 0,55	0,59 – 0,65
2050	0,92 – 1,02	0,88 – 0,98

Tab. 4-23 Jährliche vermiedene THG-Emissionen durch Nutzung von ORC-Anlagen zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	0,59 – 0,65	0,70 – 0,77
2030	1,27 – 1,40	1,50 – 1,66
2040	2,25 – 2,48	2,66 – 2,94
2050	3,12 – 3,45	2,99 – 3,31

Teilkriterium 4.2 Vermiedene oder gestiegene andere Emissionen

Durch die Nutzung von industriellen Abwärmepotenzialen zur Erzeugung von Elektrizität wird Strom entsprechend dem Deutschen Strommix verdrängt. Das bedeutet, dass alle weiteren Emissionen im Zusammenhang mit der Stromproduktion aus fossilen Brennstoffen in gleichem Maße gemindert werden wie die oben berechneten Werte für CO₂.

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Teilkriterium 5.1 Energieeffizienz

Die beiden hier detailliert betrachteten Technologien erhöhen die Energieeffizienz industrieller Anlagen, indem sie einen Teil der sonst ungenutzten Abwärme zur Herstellung von Elektrizität verwerten. Dadurch wird die Gesamtenergiebilanz der jeweiligen industriellen Anlage erhöht. Zur Berechnung des vermiedenen Primärenergieeinsatzes im Bezugsjahr wird hier der deutsche Kraftwerkspark bzw. dessen durchschnittlicher elektrischer Wirkungsgrad als Referenztechnologie angesetzt. Der durchschnittliche Wirkungsgrad der eingesetzten Kraftwerkstypen Braun- und Steinkohle sowie Gas-Kraftwerke lag im Jahr 2016 gewichtet nach den geleisteten Volllaststunden laut UBA bei 43,2 % (Umweltbundesamt 2016). Zur Berechnung des vermiedenen Primärenergieeinsatzes werden die Daten aus Tab. 4-13 und Tab. 4-17 genutzt. In Tab. 4-24 wird der vermiedene Primärenergieeinsatz im Bezugsjahr dargestellt, nicht der kumulierte vermiedene Primärenergieeinsatz bis zum Bezugsjahr innerhalb der jeweiligen Zeitscheibe, wobei die Berechnung des vermiedenen Primärenergieeinsatzes innerhalb der betrachteten Zeitscheiben linear erfolgt. Die im Deutschen Strommix enthaltenen Energiemengen aus noch aktiven Kernkraftwerken und aus regenerativer Erzeugung wurden entsprechend ihren Anteilen berücksichtigt. Die zu erwartenden Veränderungen des Kraftwerksparks, dessen durchschnittlicher Wirkungsgrad sowie der zukünftige Strombedarf gemäß AMS-Szenario wurden ebenfalls berücksichtigt.

Tab. 4-24 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

PJ/a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	0,47 – 0,52	0,56 – 0,62
2030	1,09 – 1,20	1,23 – 1,36
2040	2,13 – 2,35	2,35 – 2,60
2050	2,30 – 2,54	2,71 – 3,00

Anmerkung: Es wird der vermiedene Primärenergieeinsatz im Bezugsjahr dargestellt, nicht der kumulierte vermiedene Primärenergieeinsatz bis zum Bezugsjahr.

Bei einem Einsatz der TEG und/oder kleiner ORC-Anlagen besteht die Möglichkeit, auch im Verkehrssektor die Gesamteffizienz zu erhöhen. Dadurch könnte gemäß der Automobilhersteller bei entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen etwa 5 % Energie eingespart werden.

Teilkriterium 5.2 Ressourceneffizienz

Durch den Einsatz von Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme werden im Betrieb keine zusätzlichen Ressourcen verbraucht. Der Bedarf an Rohstoffen zur Herstellung der auf den betrachteten Technologien basierenden Anlagen wird an dieser Stelle nicht betrachtet. Die kritischen Elemente zur Herstellung werden in Tab. 3-8 angegeben. Jedoch ist aus heutiger Sicht, insbesondere für TEG, nicht klar, welche Elementkombinationen im Jahr 2050 zum Einsatz kommen. An dieser Stelle ist ein erhöhter Aufwand in der Materialforschung erforderlich.

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Sowohl TEG als auch ORC-Anlagen erzeugen derzeit Strom zu deutlich höheren Kosten als konventionelle Kraftwerke. Die Kosten für TEG betragen je nach Expertenmeinung bis zu 40 €/Watt, bei ORC-Anlagen bis zu 4 €/W. Heutige Prognosen sagen erreichbare Kosten von 0,50 – 1,00 €/W voraus. Damit könnten beide Technologien mit großer Wahrscheinlichkeit, in Abhängigkeit individueller Faktoren wie Laufzeit, Lastprofil, Betriebskosten und Lebensdauer, die Markt- und Wettbewerbsfähigkeit erreichen. Im Vergleich dazu liegen die Kosten für eine komplett aufdach installierte und elektrisch angeschlossene PV-Anlage bei rund 1,40 €/W_{peak}. Dieser Preis muss bei der Installation bzw. der Integration von TEG oder ORC-Anlagen in bestehende Systeme ebenfalls erreicht werden, um eine vermarktbare Breitentechnologie zu erhalten. Bestandteile der kompletten Anlage sind insbesondere: Thermoelektrische Generatoren bzw. ORC-Anlage, Wärmeübertrager, Hilfssysteme und Kühlung sowie die Kosten für die hydraulische und elektrische Installation/Einbindung.

Teilkriterium 6.1 Einsparung direkter und indirekter Kosten

Beim Einsatz von Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme fallen keine Brennstoffkosten an, da hier davon ausgegangen werden kann, dass die genutzte

Abwärme ansonsten ohne weitere Wandlung/Verwertung an die Atmosphäre abgegeben wird. Durch die Produktion von Strom wird eine dementsprechende Einsparung bezüglich der Brennstoffkosten erzielt.

Mehrkosten entstehen durch Investitionen für die betrachteten Abwärmeverstromungstechnologien TEG und ORC, deren Einbau/Integration in bestehende oder neue Systeme sowie für deren Wartung und Instandhaltung.

In Tab. 4-25 werden die jährlichen Kosteneinsparpotenziale bzw. Mehrkosten anhand der Stromgestehungskosten aus Tab. 1-1 (TEG) und Tab. 1-2 (ORC) sowie anhand der Marktentwicklungen aus Tab. 4-13 und Tab. 4-17 in den jeweiligen Basisjahren in Millionen €/a dargestellt. Als Referenz wurde der Börsenstrompreis des AMS-Szenarios genutzt. Dabei bedeuten positive Werte Mehrkosten und negative Werte Kosteneinsparungen gegenüber dem Referenzstrompreis.

Tab. 4-25 Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale durch das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr)

Mio. € _{2015/a}	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	0,7 bis 6,9	0,8 bis 8,1
2030	-3,1 bis -12,9	-3,6 bis -15,2
2040	-68,7 bis -70,5	-81,1 bis -83,3
2050	-108,0 bis -115,0	-127,7 bis -135,9
Grau hinterlegte Felder: negative Werte (Mehrkosten)		

Teilkriterium 6.2 Externe Kosten

Zur Berechnung der vermiedenen externen Kosten wurden die Ansätze bezüglich der CO₂-Zertifikatspreise aus (Ökoinstitut und Fraunhofer ISI 2015) angesetzt. Die Berechnung erfolgt hier nur für die vermiedenen CO₂-Emissionen für die Basisjahre 2020, 2030, 2040 und 2050 sowohl für das 80 %-Szenario (Tab. 4-26) als auch für das 95 %-Szenario (Tab. 4-27).

Tab. 4-26 Jährlich vermiedene externe Kosten in Deutschland durch das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme im 80 %-Szenario für den Schadstoff CO₂

Schadstoff:CO ₂	Spezifische externe Kosten	Vermiedene Emissionen nach Tab. 4-21	Vermiedene externe Kosten
Jahr/Einheit	€/t CO ₂	Mio. t CO ₂ /a	Mio. €/a
2020	23	0,059 – 0,065	1,4 – 1,5
2030	50	0,102 – 0,113	5,1 – 5,7
2040	90	0,167 – 0,184	15,0 – 16,6
2050	130	0,202 – 0,223	26,2 – 29,0

Tab. 4-27 Jährlich vermiedene externe Kosten in Deutschland durch das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme im 95 %-Szenario

Schadstoff CO ₂	Spezifische externe Kosten	Vermiedene Emissionen nach Tab. 4-21	Vermiedene externe Kosten
Jahr/Einheit	€ ₂₀₁₅ /t Schadstoff	Mio. t Schadstoff/a	Mio. € ₂₀₁₅ /a
2020	30	0,070 – 0,077	2,1 – 2,3
2030	87	0,121 – 0,134	10,5 – 11,6
2040	143	0,197 – 0,218	28,7 – 31,1
2050	200	0,194 – 0,214	38,7 – 42,8

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Über die bisherigen Marktanteile des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme sind keine Daten vorhanden. Im Rahmen des Verbundprojekts „Abwärmeatlas Deutschland“ der Partner IZES gGmbH (2016), dem Institut für Demoskopie Allensbach und des Fraunhofer IPM (2016) wurde das vorhandene Abwärmepotenzial in Deutschland im Industriesektor erstmals bundesweit abgeschätzt. Aus dieser Potenzialbestimmung lässt sich jedoch nicht ermitteln, wie viel Abwärme bereits zur Verstromung bzw. überhaupt genutzt wird. Die in Tab. 4-4, Tab. 4-8, Tab. 4-13 und Tab. 4-17 ermittelten absoluten Marktpotenziale je Zeitscheibe für TEG und ORC ab 2020 können jedoch zur Prognose des zukünftigen Marktanteils in der Stromerzeugung verwendet werden. Als Basisdaten für die prognostizierten Endenergieverbräuche in Deutschland wurden die Daten der Energieflussbilder der AG Energiebilanzen (AGEB) (2017) und Schlesinger et al. (2011) verwendet, die Basisdaten für die internationale Prognose wurden der Statistik der International Energy Agency (2017) entnommen. Die jeweiligen Anteile an der nationalen und globalen Bereitstellung von Endenergie in Form von Strom werden in Tab. 4-28 dargestellt. Demnach könnten bis 2050 ca. 6,0 % des Endenergieverbrauchs bezogen auf Strom

in Deutschland sowie 6,7 % weltweit durch die Nutzung von industrieller Abwärme erzeugt werden.

Tab. 4-28 Analyse des bisherigen Marktanteils für das Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2020	2030	2040	2050
%-Anteil an Strom in TWh (national)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,31	1,07	2,87	6,04
%-Anteil an Strom in TWh (global)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,35	1,23	3,27	6,67

Für das zukünftige Marktpotenzial des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme lassen sich durch Addition der Potenziale für TEG und ORC die Marktpotenziale für deutsche Unternehmen in Deutschland sowie international prognostizieren, siehe dazu Tab. 4-29. Dargestellt ist das nationale sowie internationale, Marktpotenzial für die Stromerzeugung aus Abwärme je Zeitscheibe.

Tab. 4-29 Globales und nationales Marktpotenzial für Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme

Jahr	International				National			
	Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	TWh		TWh		TWh		TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	66	73	79	87	1,2	1,4	1,5	1,6
2021-2030	220	243	260	288	2,9	3,2	3,5	3,8
2031-2040	638	713	754	843	6,5	7,1	7,6	8,4
2041-2050	1384	1522	1636	1799	10,6	11,7	12,5	13,9

Die inländische Wertschöpfung für die Nutzung der Technologien TEG und ORC ist in Tab. 4-30 dargestellt. Die angegebenen Beträge beziehen sich auf die in Tab. 1-1 und Tab. 1-2 angegebenen Investitionen. Die zugrunde gelegten Potenziale sind Tab. 4-5, Tab. 4-9, Tab. 4-14 und Tab. 4-18 entnommen. Die Ermittlung des Gesamtinvestitionsvolumens wurde unter der Annahme gemacht, dass 40 % des nationalen und 15 % des internationalen Potenzials von deutschen Firmen ausgeführt werden können.

Tab. 4-30 Inländische Wertschöpfung basierend auf Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme hinsichtlich des globalen und des nationalen Absatzmarktes

Jahr	International				National			
	Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Mrd. € _{2015/a}		Mrd. € _{2015/a}		Mrd. € _{2015/a}		Mrd. € _{2015/a}	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014-2020	5	13	6	15	0,3	0,8	0,4	0,9
2021-2030	10	25	12	29	0,4	1,2	0,5	1,4
2031-2040	21	41	25	48	0,7	1,4	0,9	1,6
2041-2050	32	51	38	61	0,8	1,4	1,0	1,6

Thermoelektrische Generatoren

In Deutschland sind die technischen Kompetenzen zur Entwicklung und zum Einsatz von TEG durch den hoch entwickelten Maschinen- und Anlagenbau, die Halbleiterindustrie, die Automobilindustrie und die gute technische Ausbildung gegeben (IZES 2016). Studien zum Abwärmepotenzial in Deutschland geben weiteren Aufschluss darüber, wo der Einsatz von TEG wirtschaftlich sinnvoll ist.

Das Förderprogramm „Thermopower“ des Bundesforschungsministeriums berichtet bereits 2012 von 41 Unternehmen und 26 Forschungseinrichtungen, die thermoelektrische Materialien und auch TEG entwickeln. Vor allem die Automobilindustrie, zum Beispiel BMW, arbeitet an der Anwendung von Thermoelektrik zur Verstromung von Abgaswärme zur Entlastung der Lichtmaschine (Frick 2012).

Die Thermoelektrik wird in Form von Peltier-Elementen jedoch ebenso bereits zur Kühlung eingesetzt. Diese erzeugen aus Strom auf direktem Weg Kälte und nutzen somit den umgekehrten Effekt eines Thermoelektrischen Generators zur Verstromung von Wärme. Know-how, Technik und Produktionsverfahren dieser Firmen könnten auf die entsprechenden Prozesse zur Herstellung von Thermoelektrischen Generatoren übertragen werden.

ORC-Prozess

Der Wasserdampfkreislauf wird bereits seit Jahrzehnten in der Energieerzeugung angewandt. Nicht zuletzt durch diese Anwendung ist die deutsche Industrie in der Lage, auf dieser Grundlage ORC-Anlagen zu entwickeln, herzustellen und zu betreiben. Der ORC-Prozess zur Stromerzeugung ist dabei der am weitesten entwickelte Prozess zur Nutzung von industrieller Abwärme. Die Anlagen werden inländisch von Firmen wie Bosch, DeVTec, Orcan und Siemens entwickelt und eingesetzt (IZES 2016). Zu den Weltmarktführern zählen jedoch vor allem Turboden aus Italien mit Sitz in Brescia im Bereich der Biomassekraftwerke und Ormat aus den USA mit Sitz in Rino, Nevada im Bereich der Niedertemperaturanwendungen. Deutsche Unter-

nehmen können hier jedoch eine starke Position aufbauen (Wietschel et al. 2010: 874 f.).

Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind hauptsächlich auf neue Arbeitsfluide, Wärmeübertrager, Expander sowie Anwendungen im kleineren Leistungsbereich konzentriert. So zum Beispiel das Projekt ORCent, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde (TIB Hannover 2017).

Kalina-Prozess

Die technische Kompetenz zur Entwicklung und zum Einsatz des Kalina-Prozesses ist durch die Erfahrungen der deutschen Industrie im Bereich der Dampfkraftwerke gegeben. Da jedoch lediglich drei Anlagen in Deutschland installiert wurden, befindet sich diese Technologie noch im Demonstrationsstadium. Josef Meier vom Siemens-Bereich Industrial Solutions and Services berichtete 2004 von rund 50 Geothermieranlagen, bei denen die Installation einer Kalina-Anlage sinnvoll möglich gewesen wäre (Janzing 2004). Produktionskapazitäten sind ebenfalls durch die bereits gesammelten Erfahrungen in Entwicklung, Herstellung, Installation und Betrieb von Wasserdampfkraftwerken und auch von ORC-Anlagen zur Stromerzeugung gegeben.

Da sich jedoch trotz der hohen Erwartungen von Siemens vor mehr als zehn Jahren weltweit kein Markt für Kalina-Anlagen entwickelt hat, kann auch in diesem Technologiebereich nicht von einer Weltmarktführung gesprochen werden (Janzing 2004). Derzeit betreibt Japan die einzigen Kalina-Anlagen zur industriellen Abwärmenutzung (Wietschel et al. 2010: 875 f.). Forschungsaktivitäten bezüglich des Kalina-Prozesses gibt es kaum (vgl. Kapitel 1.3), jedoch besitzt Siemens die Lizenz des Kalina-Prozesses für ganz Europa (Janzing 2004).

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

Thermoelektrische Generatoren

Anwendungen von TEG im Bereich der Abwärmenutzung sind international hauptsächlich in der Automobiltechnik zu finden. Im internationalen Vergleich ist die deutsche Industrie im Bereich Thermoelektrik zur Stromerzeugung aus Abwärme im Automobilbereich als derzeit nicht konkurrenzfähig einzustufen, da diese noch nicht marktreif sind, bzw. sich noch am Anfang der Entwicklung befinden (Brüninglinghaus 2013). Im Bereich der industriellen Abwärmenutzung sind derzeit F&E- sowie Demonstrationsanlagen in Betrieb. Im Falle einer erfolgreichen Weiterentwicklung der derzeitigen Forschungsarbeiten, z.B. bei Fraunhofer IPM, kann sich ein international wettbewerbsfähiges Produkt entwickeln, siehe dazu auch Tab. 4-31.

Tab. 4-31 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie im Bereich Thermoelektrischer Generatoren innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how im Bereich Thermoelektrischer Generatoren innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme weltweit?

Technologiefeld ☐ Technologieführerschaft ☐ wettbewerbsfähig
☒ nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig ☐ abgeschlagen

ORC-Prozess

ORC-Anlagen sind in Deutschland schon seit Jahrzehnten etabliert. Firmen wie DeVeTec, Bosch, Orcan und Siemens entwickeln, vertreiben und installieren ORC-Anlagen innerhalb eines großen Leistungsbereichs. Daher ist die deutsche Industrie im Bereich ORC-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme als international wettbewerbsfähig einzustufen, siehe dazu auch Tab. 4-32.

Tab. 4-32 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie im Bereich ORC-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how im Bereich ORC-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme weltweit?

Technologiefeld ☐ Technologieführerschaft ☒ wettbewerbsfähig
☐ nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig ☐ abgeschlagen

Teilkriterium 8.2 F&E Budgets

Bezüglich der spezifischen F&E Budgets in Deutschland für die beiden betrachteten Technologien zur Abwärmeverstromung liegen explizit keine Daten vor. Die Technologien werden nicht einzeln gefördert wie beispielsweise PV-Anlagen oder Brennstoffzellenheizungen. In den vergangenen 5-7 Jahren wurden im Bereich ORC-Anlagen einige Verbundvorhaben gefördert. Aus dieser einfachen Betrachtungsweise ergeben sich Budgeterhöhung von rund 500.000 € zu Beginn des Jahrzehnts auf rund 1 Mio.€ in den vergangenen drei Jahren. Das deutet auf eine Zunahme insbesondere im Bereich angewandter F&E hin. Die Förderbudgets für TEG lagen Anfang des Jahrzehnts bei rund 2 Mio. € und sind gesunken auf rund 1 Mio. € in den letzten drei Jahren. Diese einfache Recherche wurde mittels der enargus Datenbank mit den Begriffen „ORC“ und „thermoelektrisch“ durchgeführt.

Teilkriterium 8.3 F&E-Outputs

Als Suchmaschine für wissenschaftliche Publikationen wurde das online Wissenschaftsportal ScienceDirect verwendet. Bei dieser Recherche kann allerdings keine Differenzierung nach Ursprungsland vorgenommen werden. Patente wurden über die Ikofax-Recherche des Deutschen Patent- und Markenamtes (DPMA) im DEPA-

TISnet (siehe Deutsches Patent- und Markenamt) recherchiert. Dort wurde beispielsweise folgender Code verwendet: *(thermoelectric(w)generator)/TI,AB AND DE/PA AND 2005/AY*. Dabei wurden die gesuchten Parameter Suchbegriff, Patentstaat und Veröffentlichungsjahr variiert. Die Analysen wurden ab dem Jahr 2005 durchgeführt.

Thermoelektrische Generatoren

Sowohl bei der Recherche wissenschaftlicher Publikationen als auch bei der Patentanalyse wurden folgende Begriffe verwendet:

- thermoelectric generator,
- thermoelectric module,
- thermoelectricity,
- thermoelectric element

Tab. 4-33 zeigt, dass zwar die weltweiten Publikationen in der Zeit von 2006 bis 2015 im jährlichen Mittel zugenommen haben, die Anzahl der Patentanmeldungen jedoch rückläufig sind. Demnach kann von einer vermehrten anwendungsnahen Forschungsaktivität ausgegangen werden, wobei die schutzrechtsfähigen Neuentwicklungen etwas zurückgehen. Mit 10 % Anteil an allen im betrachteten Zeitraum registrierten Patenten, welche unter den genannten Suchbegriffen recherchiert werden konnten, trägt Deutschland maßgeblich zur Weiterentwicklung dieser Technologie bei.

Tab. 4-33 Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung im Bereich Thermoelektrische Generatoren innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme – Output-Orientierung

	relativ	absolut
Akademische Publikationen als Forschungsindikator		
Relativer Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2015)	k.A.	k.A./13.756
Zeitlicher Trend (2006-2015, weltweit)	12 %/a	169
Patente als Entwicklungsindikator		
Relativer Anteil der von deutschen Firmen/Privatpersonen und Institutionen eingereichten Patente am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2015)	10 %	787/7904
Zeitlicher Trend (2006- 2015, weltweit)	5 %/a	18

ORC-Prozess

Sowohl bei der Recherche wissenschaftlicher Publikationen als auch bei der Patentanalyse wurden folgende Begriffe verwendet:

- ORC process,
- organic rankine cycle,
- ORC plant

Tab. 4-34 zeigt eine jährliche Steigerung der weltweit verfassten Patente in der Zeit von 2006 bis 2015 von 15 % und der Publikationen um 17 %. Dies zeigt das vermehrte Interesse an der Nutzung dieser Technologie und der Forschungsarbeit in diesem Bereich. Mit 4 % Anteil an allen verfassten Patenten, die unter den genannten Suchbegriffen recherchiert werden konnten, trägt Deutschland zur Entwicklung dieser Technologie in moderatem Maße bei.

Tab. 4-34 Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung im Bereich ORC-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme – Output-Orientierung

	relativ	absolut
Akademische Publikationen als Forschungsindikator		
Relativer Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2015)	k.A.	k.A./7733
Zeitlicher Trend (2006-2015, weltweit)	17 %/a	125
Patente als Entwicklungsindikator		
Relativer Anteil der von deutschen Firmen/Privatpersonen und Institutionen eingereichten Patente am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2015)	4 %	207/5507
Zeitlicher Trend (2006-2015, weltweit)	15 %/a	63

Kalina-Prozess

Sowohl bei der Recherche wissenschaftlicher Publikationen als auch bei der Patentanalyse wurden folgende Begriffe verwendet:

- Kalina process,
- Kalina plant

Tab. 4-35 Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung im Bereich Kalina-Anlagentechnik innerhalb des Technologiefelds Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme – Output-Orientierung

	relativ	absolut
Akademische Publikationen als Forschungsindikator		
Relativer Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2015)	k.A.	k.A./1910
Zeitlicher Trend (2006- 2015, weltweit)	16 %/a	29
Patente als Entwicklungsindikator		
Relativer Anteil der von deutschen Firmen/Privatpersonen und Institutionen eingereichten Patente am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2015)	86 %	6/7
Zeitlicher Trend (2006- 2015, weltweit)	k.A.	k.A.

Tab. 4-35 zeigt, dass die Forschungsarbeiten zu Kalina-Prozessen weitestgehend eingestellt sind. In der Zeit von 2006 bis 2015 wurden lediglich sieben Patente verfasst, welche durch die Suchbegriffe recherchiert werden konnten. Alle sieben Patente stammen aus dem Jahr 2009! Sechs dieser Patente wurden in Deutschland verfasst, wodurch Deutschland den weitaus größten Anteil an den internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Technologiefeld geleistet hat. Im Bereich der wissenschaftlichen Publikationen ist jedoch ein Zuwachs von 16 % pro Jahr zu vermerken. Demnach scheint die Kalina-Technologie im Bereich der angewandten F&E zunehmend interessant zu werden.

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Im betrachteten Themenfeld muss vor allem zwischen industrieller Abwärme und Abwärme im Bereich Transport und privater Haushalte differenziert werden. Dabei werden derzeit sowohl ORC- als auch Kalina-Anlagen aufgrund ihrer Leistungsgröße und dem notwendigen finanziellen Aufwand überwiegend zur Verstromung industrieller Abwärme genutzt. Der Bereich Geothermie, vergleiche dazu *Technologiebericht 1.2*, wird an dieser Stelle nicht betrachtet. TEG können durch die unterschiedlichen Größen und möglichen elektrischen Leistungen sowohl im Privatbereich als auch im industriellen Bereich sowie im Transportsektor – zur Energierückgewinnung und einhergehenden Kraftstoffeinsparung – eingesetzt werden.

Die Akzeptanz-Bewertung Thermoelektrischer Generatoren erfolgt daher für den Bereich Industrie, Transport und privat getrennt voneinander. ORC-Anlagen und Kalina-Anlagen werden nur im Bereich der Industrie eingesetzt und daher auch nur für diesen Bereich bewertet. Für alle Technologien wird nur der Bereich der Stromerzeugung aus Abwärme betrachtet. Weitere Anwendungsfelder wie beispielsweise Geothermie werden nicht zur Bewertung der gesellschaftlichen Akzeptanz herangezogen. Eine Zusammenfassung der Akzeptanzbewertung ist in Tab. 4-36 dargestellt.

Auf Marktebene sind TEG in allen Anwendungsbereichen derzeit mit einer eher niedrigen Akzeptanz zu bewerten, da diese bislang nur aus als toxisch eingestuften Materialien wie Wismuttellurid und/oder Bleitellurid kommerziell erhältlich sind und derzeit noch nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Durch diese Einstufung wird auch durch Ausnahmeregelungen keine steigende Akzeptanz für Elemente, welche auf diesen Materialien basieren, erwartet (BINE Informationsdienst 2014). In der Industrie werden TEG zur Verstromung von Abwärme derzeit, insbesondere aufgrund des geringen Wirkungsgrades und des vergleichsweise hohen Preises, nur vereinzelt in Demoprojekten eingesetzt. Auf dem Gebiet der Abgaswärmeverstromung in Fahrzeugen befinden sie sich jedoch bereits in der Testphase (Stiewe 2015). Im privaten Bereich finden TEG vor allem im Bereich Campingausrüstung, eingesetzt als Kühlelemente für Kühlschränke sowie als Stromgenerator zur Nutzung von Koch(ab)wärme, Anwendung (Forschungszentrum Jülich 2017).

TEG werden auf Gesellschaftsebene trotz der Toxizität der derzeit noch eingesetzten Bleiverbindungen mit einer eher hohen Akzeptanz bewertet. Im Gegensatz zu den Kreislaufprozessen können diese beispielsweise aktiv zur Effizienzsteigerung des eigenen Fahrzeuges und so zur Kostenersparnis in Ausgaben für Treibstoff beitragen. Außerdem ist durch den eher einfachen Aufbau der TEG kein Installationsaufwand –

bis auf die Integration des TEG bzw. dessen Wärmeübertrager in den Abwärmestrom – notwendig, wodurch der breite Zugang zu diesem Anwendungsfall zukünftig erleichtert werden sollte. Auch im Freizeitbereich können TEG sinnvoll zur Stromerzeugung sowie Kühlung von Lebensmitteln, zur Rückgewinnung von Koch(ab)wärme beim Camping beitragen und somit zur Effizienzsteigerung in diesem Bereich beitragen.

Tab. 4-36 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	Marktakzeptanz		Sozialpol. Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)
Thermoelektrische Generatoren (Industrie / Transport / privat)	5 / 4 / 3	+ Wartungsfreiheit + Nutzung diskontinuierlicher Abwärmeströme - Preis - geringer Wirkungsgrad - Toxizität	o / 1 / 2	+ kaum Installationsaufwand + Effizienzsteigerung durch Energierückgewinnung + autarkes System + keine Flüssigkeiten - Toxizität	1 / 1 / 2	+ geräuschlos + platzsparend + keine Flüssigkeiten - mögliche Bedenken bei als toxisch eingestuftem Materialien (wie bspw. Bleitellurid)
ORC-Prozess	3	+ Wirkungsgrad + große elektrische Leistungen + große Temperaturbereiche - Preis - Notwendigkeit hoher Abwärmeströme	o	durch Anwendung in der Industrie sind auf Gesellschaftsebene weder Akzeptanz noch Ablehnung zu erwarten	2	- Größe
Kalina-Prozess	5	+ Wirkungsgrad + große elektrische Leistungen + Anpassung an Temperaturschwankungen - Preis - Komplexität des Systems - int. wenige Anlagen	o	durch Anwendung in der Industrie sind auf Gesellschaftsebene weder Akzeptanz noch Ablehnung zu erwarten	4	- Größe - Bedenken durch Verwendung von Ammoniak als Arbeitsmittel (besondere Anforderungen bei Anlagenwartung)

Bewertung: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5), Akzeptanz nicht relevant bzw. nicht einschätzbar (o)

Auch auf lokaler Ebene können TEG mit ihrem einfachen Aufbau und der platzsparenden Bauweise punkten. Sie arbeiten emissions- und geräuschlos, sodass weder Mensch noch Umwelt durch diese Technik gefährdet/gestört werden. Einzig die Verwendung von zwar schwer löslichen aber dennoch als toxisch eingestuften Materialien wie beispielsweise Bleitellurid könnte vor allem im privaten Bereich zu Akzeptanzproblemen führen.

ORC-Anlagen werden zur Verstromung industrieller Abwärme bereits kommerziell genutzt. Gegenüber TEG haben sie vergleichsweise hohe Wirkungsgrade. Ein Nachteil ist jedoch, dass zur Wirtschaftlichkeit einer solchen Investition große und möglichst stetig vorhandene Abwärmeströme vorhanden sein müssen. ORC-Anlagen werden aus diesen Gründen auf Marktebene mit einer mittleren Akzeptanz bewertet. Auf gesellschaftlicher Ebene ist die Akzeptanzeinschätzung von ORC- und Kalina-Anlagen eher irrelevant, da die Bevölkerung/die Gesellschaft von diesen Anlagen weder direkt noch indirekt (zum Beispiel durch Emissionen) betroffen ist. Lokal betrachtet bestimmt das Platzangebot die Möglichkeiten bezüglich einer wirtschaftlichen Installation einer Anlage. Da diese hauptsächlich in bestehende Industrieprozesse nachgerüstet werden, sind weder durch Geräusche noch durch Landschaftszerstörungen Akzeptanzhemmnisse zu erwarten. Wird eine ORC-Anlage in einen Neubau eingeplant, ist ebenfalls mit keinen Akzeptanzschwierigkeiten zu rechnen, da sich diese eher auf die Gesamtanlage und nicht auf die effizienzsteigernde Maßnahme, welche nur einen geringen Anteil des Gesamtbaus ausmacht, konzentriert.

Der Kalina-Prozess findet – ähnlich wie die Thermoelektrik - kaum Anwendung in der Stromerzeugung mittels Abwärme. Dies ist hauptsächlich der Komplexität des Systems und den hohen Investitionen geschuldet, siehe dazu insbesondere Kapitel 6, wodurch der Kalina-Prozess mit einer niedrigen Akzeptanz auf Marktebene bewertet werden muss. Auch auf lokaler Ebene ist die Installation der Anlagen durch Bedenken bezüglich des Arbeitsmediums Ammoniak im Ammoniak-Wasser-Gemisch gehemmt. Weitere Gründe zur Akzeptanzbewertung sind der Evaluierung von ORC-Anlagen zu entnehmen.

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Im Folgenden wird die Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der beiden betrachteten Stromerzeugungstechnologien zur Abwärmenutzung beschrieben.

TEG- und ORC-Anlagen zur Verstromung von Abwärme sind im Rahmen der Effizienzsteigerung bestehender/neu zu bauender Anlagen flexibel einsetzbar. Durch einen Ausbau dieser eher dezentralen Anlagen, werden aufgrund des zu erwartenden Eigenverbrauchs sowie der absoluten produzierten Strommenge der Einzelanlagen das vorgelagerte Stromversorgungsnetz nicht maßgeblich beeinflusst wodurch auch spätere Umplanungen ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden können. Aufgrund der Dezentralität können die Anlagen zurückgebaut bzw. leicht durch andere Technologien ersetzt werden. Da die Indikatoren zur Bewertung dieses Kriteriums für die zu bewertenden Technologien unterschiedlich sind, erfolgt die Einstufung nicht auf Technologiefeldebene, sondern auf Technologieebene.

Thermoelektrische Generatoren

Da TEG derzeit noch nicht bzw. nur in wenigen Demonstrationsvorhaben zur Abwärmeverstromung genutzt werden, sind weder die tatsächlichen Planungs- noch Bauzeiten bekannt. Für die Zukunft sind dennoch relativ kurze Planungszeiten von zwei bis sechs und Bauzeiten von drei bis vier Monaten anzunehmen, welche über die Zeit durch Erfahrungsgewinn und eventuelle Automatisierung verkürzt werden können. TEG müssen lediglich für den anfallenden Abwärmestrom ausgelegt und die Integration des Wärmeübertragers in die Abwärmequelle geplant und realisiert werden. Zusätzlich muss die Anbindung an das bestehende Stromnetz erfolgen. Die ökonomische Nutzungsdauer sowie spezifische Investitionen sind Tab. 1-1 zu entnehmen. Die derzeit hohen spezifischen Investitionen sind vor allem dem Umstand geschuldet, dass derzeit noch keine bzw. kaum geeignete Verfahren zur seriellen und kostengünstigen Herstellung von TEG existieren. Ein halbautomatisches Herstellungsverfahren, im Juli 2016 vom Fraunhofer IPM vorgestellt, konnte die Produktionskosten der dort entwickelten TEG um den Faktor 10 verringern (Fraunhofer IPM 2016). Es ist davon auszugehen, dass vollautomatische Produktionsketten die Kosten noch weiter senken können.

Tab. 4-37 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme (TEG)

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	k.A.	2-6	1-4	1-3	1-3
Bauzeit	Monate	k.A.	3-4	3-4	2-3	2-3
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	4-5	8	>10	>15	>20
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /kW	1000-40.000	1000-10.000	750-5.000	750-1.500	500-1.000

ORC-Prozess

Die Planungsdauer für ORC-Anlagen ist ähnlich einzustufen wie die von TEG. Für die Zukunft sind jedoch, insbesondere im Zusammenhang mit der Anlagengröße und dem individuellen Einbauort, relativ kurze Planungs- und Bauzeiten von zwei bis sechs bzw. drei bis sechs Monaten mit fallender Tendenz anzunehmen. Die Planung sowie der Aufbau von ORC-Anlagen sind aufgrund des flüssigen Arbeitsmediums, der einzelnen Komponenten, der Größe und der Überwachungsnotwendigkeit deutlich aufwendiger als bei TEG. Da ORC-Anlagen jedoch bereits als modulare Komplettanlagen erhältlich sind, ist es bei Anwendungsfällen, bei denen eine Installation dieser Anlagen möglich ist, lediglich nötig, diese für den anfallenden Abwärmestrom auszulegen sowie die Integration des Wärmeübertragers in die Abwärmequelle zu planen und zu realisieren. Zusätzlich muss auch bei ORC-Anlagen die Anbindung an das bestehende Stromnetz erfolgen. In einer Pressemitteilung von ÖKOBIT wird für eine nachgerüstete ORC-Anlage an eine Biogasanlage mit Blockheizkraftwerk von einer Bauzeit von sechs Monaten berichtet (Nottinger 2017). Überwachungseinrichtungen und Arbeitsschutzmaßnahmen (bspw. wegen der Arbeitsfluide) können den Planungsprozess sowie die Bauphase von ORC-Anlagen jedoch verlängern. Daher

wird die obere Grenze der Planungs- und Bauzeit bis 2050 nur in geringem Maße abnehmen, was insbesondere aufgrund von Erfahrungsgewinn und eventuellen Automatisierungsmöglichkeiten begründet werden kann. Die ökonomische Nutzungsdauer sowie spezifische Investitionen sind Tab. 1-2 zu entnehmen.

Tab. 4-38 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme (ORC)

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	2-6	2-6	2-5	1-5	1-5
Bauzeit	Monate	3-6	3-6	2-5	2-5	3
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	>15	>15	>15	>20	>20
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /kW	8.000-3.000	6.000-2.500	4.000-2.000	2.500-1.500	1.500-1.000

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Thermoelektrische Generatoren können ein System unter der Voraussetzung einer Mindestwärmestromdichte von 10 W/cm² autark ohne Stromnetzanbindung mit Energie versorgen (König 2009). Zur Einspeisung des erzeugten Stroms ist jedoch ein Zugang zum Stromnetz notwendige Voraussetzung. Die Anbringung/Installation kann aufgrund der variablen Größen (Menge der geschalteten Thermoelektrischen Module/Elemente) fast überall erfolgen.

ORC- und Kalina-Anlagen hingegen sind durch ihre Größe und die Komplexität des Prozesses an ein entsprechendes Platzangebot sowie an IKT-Infrastrukturen gebunden. Die Verteilung der gewonnenen Energie kann – wie bei TEG auch – sowohl dezentral als auch zentral erfolgen, wodurch hier ebenfalls ein Zugang zum Stromnetz notwendig ist.

Die elektrische Anbindung und ein Mindestmaß an Infrastruktur werden bei allen Technologien zur Umwandlung von Abwärme in elektrische Energie benötigt.

Alle hier vorgestellten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme können den erzeugten Strom in das öffentliche Stromnetz einspeisen und somit einen Beitrag zur geringeren Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen leisten, zur Effizienzsteigerung der bestehenden Anlagen beitragen und aufgrund der teilweisen Eigenbedarfsdeckung wirtschaftliche Vorteile bewirken. Besondere Infrastrukturmaßnahmen sind nicht notwendig, Engpässe in der Infrastruktur können durch die betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme sogar ausgeglichen werden (Wietschel et al. 2010: 884).

Tab. 4-39 Abhängigkeit des Technologiefeldes Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme von Infrastrukturen

	TEG		ORC/Kalina	
	Ja	Nein	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Die Systemkompatibilität der Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme ist unter derzeitigen Bedingungen ohne Anpassungsbedarf gegeben. Risiken für die Technologien ergeben sich insbesondere hinsichtlich der vorhandenen industriellen Abwärmequellen. Bei der Planung zum Einsatz von Technologien zur Abwärmeverstromung ist insbesondere darauf zu achten, dass die langfristige Verfügbarkeit der Abwärmeströme bei gleichbleibendem Temperaturniveau beachtet wird. Externe Faktoren, wie beispielsweise identifizierte und sinnvoll durchführbare Verbesserung bezüglich der Effizienz der Abwärmequelle, kurz- oder mittelfristig geplante Prozess- und/oder Produktwechsel sowie ggf. vorhandene Pläne zur Standortverlagerung/-schließung der Produktionsstätte müssen ebenfalls ausreichend beachtet wurden.

Thermoelektrische Generatoren

Die Thermoelektrik zeichnet sich vor allem durch ihre Wartungsfreiheit, da keinerlei bewegliche Teile vorhanden sind, ihre Autarkie, ihre Langlebigkeit und ihre Kompaktheit aus. Dadurch können Thermoelektrische Generatoren auch an Stellen implementiert werden, die sehr schwer zu erreichen sind.

Folgend werden die Anwendungsbereiche in der Automobilindustrie, der Sensor- und Regelungstechnik und der industriellen Abwärmennutzung vorgestellt, da diese Bereiche den größten Erfolg hinsichtlich einer sinnvollen, wirtschaftlichen und effizienten Anwendung von Thermoelektrischen Generatoren versprechen.

Weitere Anwendungsgebiete sind in Bereichen zu finden, die am Anfang der Forschung oder noch in der Phase der Ideenfindung stehen. Darunter fallen beispielsweise Anwendungen in der Solarthermie, der Körperwärmeverstromung und somit auch der Medizintechnik (König 2009).

Anwendungsfall 1: Automobilindustrie

Durch die Anwendung Thermoelektrischer Generatoren im Transportbereich wird Strom, der sonst über die Lichtmaschine eines Fahrzeuges erzeugt wird, mithilfe von

TEG aus der Abgasabwärme des Fahrzeugs erzeugt. Dadurch wird die Lichtmaschine entlastet, wodurch laut BMW eine Kraftstoffverbrauchsminderung von bis zu 5 % erreicht und somit auch die entsprechenden Schadstoffemissionen verringert werden können (Frick 2012). Sonstige Rückwirkungen auf weitere Technologien sind hierbei nicht zu erwarten.

Zur Systemkompatibilität ist kein besonderer Aufwand nötig. TEG müssen elektrisch mit den zu versorgenden Komponenten verbunden werden. Da das Abwärmepotenzial eines Transportmittels mit der Nutzungszeit zunimmt und zu Beginn sehr gering ist, muss eventuell eine Regelungseinheit hinzugefügt werden, um eine Kommunikationsmöglichkeit mit der Lichtmaschine herzustellen.

Konkurrenzen mit anderen Technologien in Bezug auf die Kraftstoffeinsparung sind beispielsweise mit Luftverdichtern in LKW zu erwarten. Diese erhöhen ebenso die Energieeffizienz des Fahrzeugs und verringern den Kraftstoffverbrauch und somit dessen CO₂-Emissionen (vgl. Voith Turbo 2017). Dennoch ist zu beachten, dass diese Systeme aufgrund ihres Gewichts bisher lediglich in Bussen und LKW eingebaut werden. TEG hingegen könnten auch im privaten Personenverkehr bzw. im PKW sinnvoll und wirtschaftlich eingesetzt werden. Aufgrund des prognostizierten Zuwachses an Elektrofahrzeugen, insbesondere im Individualverkehr, ist davon auszugehen, dass das nutzbare Potenzial im Verkehrsbereich mittel- bis langfristig deutlich abnimmt.

Anwendungsfall 2: Sensor- und Regelungstechnik

Thermoelektrische Generatoren können und werden teilweise bereits zur autarken Energieversorgung von Messsensoren in der Wissenschaft und im Haushalt (großes Potenzial bietet hier die Heizungsregelung) eingesetzt. Durch die Verwendung von TEG in der Wissenschaft kann die dort eingesetzte Messtechnik unabhängig von äußeren Einflüssen zuverlässig, insbesondere auch an abgelegenen Orten betrieben werden. Durch die Verwendung von TEG im Haushaltsbereich kann beispielsweise durch die Implementierung in ein Heizsystem eine autarke Messeinrichtung eingerichtet werden, welche eine Verbindung zur Regelungseinheit herstellt und so automatisch Heizungsventil und Vorlauftemperatur einstellen kann. Andere Anwendungsfelder im Haushalt, wie eine autarke Messeinrichtung zur Temperaturerfassung im Kochtopf, benötigen zur Systemkompatibilität ebenfalls eine Regelungseinheit, welche die erfassten Messdaten auf das System überträgt und dieses an die Gegebenheiten anpasst. Beim Kochen zum Beispiel kann so eine Energieverbrauchsreduzierung von bis zu 50 % erreicht werden (Frick 2012). Zu anderen Technologien besteht derzeit auch in diesem Anwendungsfall keine Konkurrenz.

Anwendungsfall 3: industrielle Abwärmenutzung

Im Anwendungsfall „industrielle Abwärmenutzung“ besteht keinerlei Rückwirkung auf angrenzende Teilsysteme oder das Gesamtsystem, da lediglich die Abwärme eines Systems genutzt wird, um diese in elektrische Energie zu wandeln. Bei konstantem Abwärmestrom ist auch eine konstante Stromausbeute zu erwarten. Hier wird durch die Nutzung der Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz verringert.

Es ist nötig, die vorliegenden Abwärmeströme vor der Installation des Thermo-elektrischen Generators zu analysieren, um einen größtmöglichen Wirkungsgrad zu erreichen. Weitere Anforderungen zur Systemkompatibilität bestehen nicht.

Thermoelektrische Generatoren werden derzeit nur für niedrige Leistungsbereiche kommerziell angeboten. Momentan stehen TEG daher nicht in Konkurrenz zu anderen Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme. Synergieeffekte könnten jedoch auftreten, wenn TEG Systeme beispielsweise ORC- und Kalina-Anlagen nachgeschaltet werden, um so die „Restabwärme“ zusätzlich zu nutzen. Erst im höheren Temperaturbereich und bei kommerziellen Angeboten in höheren Leistungsbereichen stehen TEG in Konkurrenz zu anderen Systemen.

ORC-Anlagen

ORC-Anlagen arbeiteten bislang in höheren Leistungsbereichen, sind mittlerweile jedoch bereits für Leistung ab 5 kW_{el} entwickelt. Der nutzbare Temperaturbereich liegt bei Temperaturen größer 85 °C (Conpower 2017). Durch die relativ aufwendige Funktionsweise, das flüssige Arbeitsmedium/die flüssigen Arbeitsmedien und die teils sehr großen Komponenten, wie beispielsweise die Wärmeübertrager, haben ORC-Anlagen einen gewissen Platzbedarf, so dass sie nicht an jedem beliebigen Ort installiert werden können.

Im Bereich der Kreislaufprozesse ist es vor allem aus diesem Grund sinnvoll, nur den Anwendungsbereich der industriellen Abwärmenutzung und der Abwärmenutzung auf Containerschiffen zu betrachten. Anwendung finden ORC-Anlagen darüber hinaus im Bereich der Geothermie und Biomassefeuerung (ORC-Fachverband 2017). Diese werden in den *Technologiefeldern 1.2: Geothermie* und *1.1: Bioenergie* erläutert.

Anwendungsfall 1: industrielle Abwärmenutzung

Beim ORC-Prozess sind – ebenso wie bei den TEG – nur in begrenztem Maße Rückwirkungen auf angrenzende Teilsysteme oder das Gesamtsystem zu erwarten, da lediglich die Abwärme eines Systems genutzt und in elektrische Energie umgewandelt wird. Es ist zu erwarten, dass der zusätzlich aus Abwärme produzierte Strom zumeist intern genutzt wird bzw. genutzt werden kann und die Strommenge in Bezug auf den Gesamtbedarf des Industriebetriebs eher gering ist. Deshalb ist auch im Falle einer Einspeisung des Stroms in das öffentliche Netz davon auszugehen, dass die vorgelagerte Netzinfrastruktur die produzierte Strommenge problemlos aufnehmen kann. Generell wird die Effizienz des Gesamtsystems durch die Verwendung einer ORC-Anlage verbessert. Zur Installation und Systemkompatibilität ist ein geeigneter Wärmetransport bzw. Wärmeübertrager notwendig, welcher die Abwärmequelle von der ORC-Anlage entkoppelt.

ORC-Prozesse stehen in direkter Konkurrenz zum Kalina-Prozess, da diese nach dem gleichen Grundprinzip arbeiten. ORC-Prozesse sind jedoch deutlich besser erforscht und aufgrund der Auswahl an verschiedenen (in Zukunft auch halogenfreien) Arbeitsmedien gegenüber dem Kalina-Prozess im Vorteil. Dies ist insbesondere aufgrund des Einsatzes von Ammoniak als Arbeitsmedium beim Kalina-Prozess begründet, da Ammoniak sowohl toxisch als auch korrosionsfördernd ist.

Anwendungsfall 2: Abwärmenutzung auf Containerschiffen

Die Anwendung von ORC-Anlagen auf Containerschiffen erzeugt Strom aus der Abgasabwärme der Schiffsmotoren. Dadurch kann laut Siemens eine Kraftstoffverbrauchsminderung von bis zu 10 % erreicht und somit auch eine entsprechende Menge an CO₂-Emissionen eingespart werden (Siemens 2013: 65 f.). Sonstige Rückwirkungen auf weitere Technologien in diesem Bereich sind nicht zu erwarten.

Zur Installation von ORC-Anlagen auf Containerschiffen ist ebenso wie bei der industriellen Abwärmenutzung darauf zu achten, dass ein geeigneter Wärmetransport bzw. Wärmeübertrager eingesetzt wird, welcher auch bei dieser Anwendung die Abwärmequelle von der ORC-Anlage entkoppelt.

Auch hier ist der Kalina-Prozess im Temperaturbereich bis etwa 200 °C derzeit die einzige identifizierbare Konkurrenztechnologie.

Kalina-Prozess

Die bisher installierten Kalina-Prozesse arbeiten in Leistungsbereichen ab 0,5 MW. Der nutzbare Temperaturbereich liegt bei Temperaturen zwischen 80 °C und 200 °C. Durch ihre relativ aufwendige Funktionsweise, das flüssige Arbeitsmedium bzw. Zweistoffsystem und die ebenfalls teils großen Komponenten hat auch eine Kalina-Anlage eine gewisse Größe, weshalb sie – ebenso wie ORC-Anlagen – nicht überall installiert werden kann. Kalina-Anlagen finden derzeit überwiegend Anwendung im Zusammenhang mit Geothermie. Die Beschreibung dieser Anwendung erfolgt im Technologiefeld 1.2 Geothermie.

Im Bereich der Kreislaufprozesse ist es vor allem aus diesem Grund sinnvoll, nur den Anwendungsbereich der industriellen Abwärmenutzung zu betrachten.

Anwendungsfall 1: industrielle Abwärmenutzung

Beim Kalina-Prozess sind – ebenso wie bei den TEG und dem ORC-Prozess – keinerlei Rückwirkungen auf angrenzende Teilsysteme oder das Gesamtsystem zu erwarten. Es wird lediglich die Abwärme eines Systems genutzt und in elektrische Energie umgewandelt, wodurch weder das Gesamtsystem noch ein angrenzendes Teilsystem beeinträchtigt wird. Die Kalina-Anlage kann zur Effizienzsteigerung in bestehenden Systemen nachgerüstet werden. Zur Installation und Systemkompatibilität ist ein geeigneter Wärmetransport bzw. Wärmeübertrager notwendig. Auch hier dient der Wärmeübertrager der Entkopplung von Abwärmequelle und Kalina-Anlage.

Der Kalina-Prozess steht in direkter Konkurrenz zum ORC-Prozess. Jedoch arbeitet eine Kalina-Anlage bei niedrigen Temperaturen um 100 °C deutlich effizienter als derzeit bekannte ORC-Anlagen (Forschungszentrum Jülich 2017). Zusätzlich sind Kalina-Anlagen durch Anpassung des Wasser-Ammoniak Gemischs imstande, den Siedepunkt/-bereich des Arbeitsmediums zu verschieben, um damit auch diskontinuierliche bzw. nicht temperaturstabile Abwärmeströme bestmöglich zu nutzen.

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

5.1 Thermoelektrische Generatoren

Eines der größten Entwicklungshemmnisse bei Thermoelektrischen Generatoren ist die Entwicklung geeigneter Materialien. Dies schließt zum einen die Entwicklung von Materialien zur Substituierung des toxischen sowie rohstoffkritischen Bleis und Tellurs und zum anderen Materialien für die verschiedenen Temperaturbereiche ein. Vor allem im Bereich der Nutzung von Abwärme im niedrigen Temperaturbereich gibt es kaum eine Alternativen zu Wismuttelluriden. Doch genau in diesem Temperaturbereich fällt die meiste Abwärme an. Daher sind vor allem für dieses Temperaturniveau geeignete Materialien zur Abwärmeverstromung zu entwickeln. Im mittleren Temperaturbereich stellen Skutterudite, Halb-Heusler-Module und Silizide eine gute Alternative zu Bleitellurid dar. Diese Materialien müssen jedoch weiter erforscht, der Preis gesenkt, die Güteziffer erhöht und die chemisch physikalischen sowie mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Auf den Erfolgen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten der Universität Duisburg-Essen (siehe Kapitel 2.1) im Bereich der Verwendung von nanokristallinem Silizium kann für die weitere Erforschung dieser Materialklasse aufgebaut werden. Zusätzlich sollte die Installation von Demonstrationsanlagen sowohl für niedrige als auch für höhere Leistungsklassen unterstützt werden, um die Funktionstüchtigkeit und Rentabilität der Thermoelektrik in diesen Bereichen unter Beweis zu stellen. Um TEG auch finanziell attraktiv zu gestalten, müssen diese automatisiert hergestellt werden können. Somit ist die Entwicklung von geeigneten Herstellungsverfahren für einen wirtschaftlichen Erfolg bzw. eine breite Marktverfügbarkeit unabdingbar.

Ein grundsätzliches Problem stellt derzeit noch die Verbindung der elektrischen Kontakte dar. Hier sind vor allem Langlebigkeit, die Resistenz gegenüber hohen Temperaturunterschieden und ein niedriger elektrischer Widerstand von Bedeutung. Das Fraunhofer IPM hat zur Lösung dieses Problems bereits eine neue Löttechnik entwickelt (Bartholomé und Fraunhofer 2013). Dennoch sollte diese Problematik im Bereich der TEG-Entwicklung berücksichtigt und weitere Verfahren zur Verbindungstechnik in Verbindung mit der Materialentwicklung erforscht werden.

5.2 ORC-Prozess

ORC-Anlagen werden derzeit hauptsächlich im mittleren Leistungsbereich und bei großen Abwärmeströmen installiert. Im Bereich des kleineren Leistungsbereichs unter 200 kW und des höheren Leistungsbereichs ab 2.500 kW sind derzeit nur wenige seriell hergestellte ORC-Anlagen auf dem Markt verfügbar (Althaus et al. 2013: 53). Lange Entwicklungs- und Planungszeiten sowie Bauzeiten für individuell angefertigte ORC-Anlagen treiben die Investitionskosten der Anlage deutlich in die Höhe. Daher ist auch für diese Bereiche eine serielle Herstellung zur Preissenkung der Anlagen erforderlich.

Ebenfalls von Bedeutung ist diesbezüglich die Entwicklung effizienter Wärmeübertrager. Dabei sind vor allem preisgünstige Materialien zu untersuchen, welche zusätzlich den Verschmutzungen von Abgasen standhalten. Fraunhofer UMSICHT berichtet bei ihren Feldversuchen ebenfalls von Problemen hinsichtlich des Wärme-

überträgers und einzelner Komponenten aufgrund der Betriebsbedingungen (Althaus et al. 2013: 39, 56). Die Entwicklung geeigneter und hochleistungsfähiger Wärmeübertrager wird auch in Wietschel et al. (2010: 887) als eine der relevantesten Forschungsschwerpunkte hervorgehoben, da diese maßgeblich den Wirkungsgrad und die entstehenden Investitionskosten beeinflussen.

Außerdem gilt es in Zukunft geeignete Arbeitsfluide für verschiedene Temperaturbereiche zu entwickeln und zu identifizieren. Dies gilt insbesondere für den Bereich halogenfreier Verbindungen. Weiterhin könnten neue ORC-Verfahrenskonzepte, wie beispielsweise ohne zwischengeschaltete Thermoölkreisläufe, untersucht werden.

5.3 Kalina-Prozess

Wie bereits Wietschel et al. (2010: 888) festgestellt hat, sollten für Kalina-Anlagen vor allem neue Arbeitsmittelpaarungen als Substitution für das toxische Ammoniak (oder auch das Ammoniak-Wasser-Gemisch) analysiert und getestet werden. Außerdem fehlen weiterhin Demonstrations- bzw. Referenzanlagen, die mögliche Anwender von dieser Technologie überzeugen könnten. Außerdem sollten Untersuchungen für die Anwendung von Kalina-Prozessen in höheren Temperaturbereichen sowie die Materialforschung im Bereich der Wärmeübertrager gefördert werden.

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2017): ag-energiebilanzen.de. <http://www.ag-energiebilanzen.de/9-o-energieflussbilder.html>
- Althaus, D.-I. W., Paucker, D.-I. R., Bünten, D.-I. B., Grob, M.-I. J., Hunstock, D.-I. B., & U. F. (2013): Entwicklungs-/Demonstrationsprojekt mit Feldversuch "ORC-Prozesse zur Abwärmenutzung an BHKW-Motoren". Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT.
- Bartholomé, D. K., & Fraunhofer, I. (2013): fraunhofer.de. <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2013/dezember/t-hermoelektrik.html>. Letzter Zugriff: 02.12.2013
- BINE Informationsdienst (2014): bine.info. <http://www.bine.info/themen/publikation/thermoelektrik-strom-aus-abwaerme/vielversprechende-te-materialien/?cHash=15efd04a70887366c87f6c8775b1eeff&type=333>
- Bosch KWK Systeme GmbH. (2017): bosch-kwk.de. <https://www.bosch-kwk.de/de/kompetenz/referenzen/referenzen-orc-systeme-bosch-kwk-systeme.html>. Letzter Zugriff: 27.05.2017
- Brüninghaus, C. (2013): springerprofessional.de. <https://www.springerprofessional.de/motorentchnik/thermodynamik---thermomanagement/strom-aus-abgasen-thermoelektrische-generatoren/6560916>. Letzter Zugriff: 15.01.2017
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017): Energiedaten: Gesamtausgabe. Letzter Zugriff: 02/2017
- Conpower (2017): dlr.rlp.de. [http://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/53a6931a0e609213c1257afd002b2348/\\$FILE/Abwaermeverstromung_conpower.pdf](http://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/53a6931a0e609213c1257afd002b2348/$FILE/Abwaermeverstromung_conpower.pdf). Letzter Zugriff: 22.03.2017
- Cryostar (2017): cryostar.com. <http://www.cryostar.com/web/power-electricity.php>. Letzter Zugriff: 22.03.2017
- Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (2013): deutsche-rohstoffagentur.de. http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-19.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Letzter Zugriff: 10/2013
- Deutsches Patent- und Markenamt: depatisnet.dpma.de. <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=ikofax>
- Ebling, D. D. (2017): izes.de. http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/BMUB_Abwaermenutzung_Ebling.pdf. Letzter Zugriff: 27.05.2017

- Eisebraun, T. (2013): Dokumente: Universität der Bundeswehr München.
<https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d8017270/Vortrag%20Eisebraun.pdf>.
- En:Eff Industrie (2015): eneff-industrie.info. <http://eneff-industrie.info/projekte/2015/thermoelektrische-generatoren-zur-stromerzeugung/>. Letzter Zugriff: 03.02.2015
- EnBW Energie Baden-Württemberg AG (2017): enbw.com.
<https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/forschung/projekte-erneuerbare-energien/geothermie/>.
- EnEff Industrie (2015): eneff-industrie.info. <http://eneff-industrie.info/projekte/2015/thermoelektrische-generatoren-zur-stromerzeugung/>. Letzter Zugriff: 03.02.2015
- Enerchange (2017): tiefengeothermie.de
<http://www.tiefengeothermie.de/projekte/taufkirchen>. Letzter Zugriff: 17.03.2017
- Enogia (2017): enogia.com. <http://www.enogia.com/lang/de/references.html>. Letzter Zugriff: 22.03.2017
- Forschungszentrum Jülich GmbH (2017): enargus.de.
https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d1712335-2/*/*Thermoelektrik.html?op=Wiki.getwiki&scope=all&search=Thermoelektrik
- Fraunhofer IPM (2017): ipm.fraunhofer.de.
<https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/funktionelle-materialien-systeme/anw/abwaerme-nutzung-verstromung.html>. Letzter Zugriff: 27.05.2017
- Fraunhofer IPM (2016): Projekt Abwärmeatlas. Freiburg, Baden-Württemberg.
- Frick, F. (2012): wissenschaft.de. http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal_content/56/12054/1560648/Thermo-Power/. Letzter Zugriff: 15.05.2012
- Geothermie Unterhaching GmbH Co KG (2017). geothermie-unterhaching.de.
http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/id/pa_daten_fakten.html. Letzter Zugriff: 17.03.2017
- GETEC heat&power AG (2017): getec-heat-power.de. http://www.getec-heat-power.de/de/technologien/orc-prozess/index.html#Entwicklung_ORC_Prozess. Letzter Zugriff: 06.04.2017
- Henning, H.-M.; Palzer, A. (2013): Energiesystem Deutschland 2050. Energiesystem Deutschland 2050. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- innova recycling GmbH (2017): innova-recycling.de. <http://www.innova-recycling.de/verkauf/refraktaermetalle/vanadium/>

- International Energy Agency (2017): [iea.org](http://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption).
[https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final %20consumption](https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption)
- international magnesium association (2017): [intlmag.org](http://www.intlmag.org).
http://www.intlmag.org/page/sustain_recycle_ima
- IZES gGmbH (2016): Projekt Abwärmeatlas. Saarbrücken.
- Janzing, B. (2004): [ingenieur.de](http://www.ingenieur.de).
<http://www.ingenieur.de/Branchen/Energiewirtschaft/Kalina-Prozess-erlebt-spaete-Renaissance>. Letzter Zugriff: 08.10.2004
- König, J. (2009): Studie zur Energietechnologie „Thermoelektrik“. Fraunhofer IPM.
- Kempkens, W. (2013): [ingenieur.de](http://www.ingenieur.de).
<http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Verfahrenstechnik/Recycling-Silizium-Herstellungskosten-fuer-Solarzellen-senken>. Letzter Zugriff: 07.11.2013
- Nottinger, R. (2017): [oekobit-biogas.com](http://www.oekobit-biogas.com). http://www.oekobit-biogas.com/wp-content/uploads/orc_de.pdf. Letzter Zugriff: 10.04.2017
- Ökoinstitut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, Karlsruhe.
- Orcan Energy (2017): [orcan-energy.com](http://www.orcan-energy.com). <http://www.orcan-energy.com/de/faq>. Letzter Zugriff: 04.04.2017
- ORC-Fachverband (2017): [orc-fachverband.de](http://www.orc-fachverband.de). <http://www.orc-fachverband.de/verbreitung.html>. Letzter Zugriff: 10.02.2017
- Ormatic (13.. Februar 2017). ORC-Anwendung. Von <http://www.ormatic.de/de/orc-energy/orc-anwendung.html> abgerufen
- Schlesinger, M. et al. (2011). Energieszenarien 2011. Basel/Köln/Osnabrück.
- Siemens (2013): [siemens.com](http://www.siemens.com).
<https://www.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/customer-magazine/old-mam-assets/print-archiv/2/industry-journal/industry-journal-2-2013-de.pdf>. Letzter Zugriff: 08/2013
- Stadtwerke Kempen (2017): [stadtwerke-kempen.de](http://www.stadtwerke-kempen.de). <http://www.stadtwerke-kempen.de/de/Kopfnavigation/Unternehmen/Unser-BHKW-Oekologische-Verantwortung/Oekologische-Verantwort/de/Kopfnavigation/Unternehmen/Unser-BHKW-Oekologische-Verantwortung/Oekologische-Verantwortung-und-saubere-Produkte.html>. Letzter Zugriff: 27.05.2017
- STEAG New Energies GmbH (2017): [steag-newenergies.com](http://www.steag-newenergies.com). https://www.steag-newenergies.com/uploads/pics/STEAG_Broschuere-Warndt_04-12_web_01.pdf. Letzter Zugriff: 27.05.2017
- Stiewe, C.; Müller, E. (2015): Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen - Chancen für NRW. Düsseldorf.

- TIB Hannover (2017): tib.eu.
[https://www.tib.eu/de/suchen/?tx_tibsearch_search\[number\]=0327436E&tx_tibsearch_search\[st\]=ex&tx_tibsearch_search\[searchspace\]=tn](https://www.tib.eu/de/suchen/?tx_tibsearch_search[number]=0327436E&tx_tibsearch_search[st]=ex&tx_tibsearch_search[searchspace]=tn). Letzter Zugriff: 29.05.2017
- Trigon (2016): triogen.nl. [http://www.triogen.nl/upload/files/productflyer WB-1 Biomass application.pdf](http://www.triogen.nl/upload/files/productflyer%20WB-1%20Biomass%20application.pdf). Letzter Zugriff: 12/2016
- Umicore (2014): umicore.com. <http://www.unicore.com/en/about/elements/>
- Umweltbundesamt (2016): umweltbundesamt.de.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-energien#textpart-5>. Letzter Zugriff: 12/2016
- Umweltbundesamt (2017): umweltbundesamt.de.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energiebedingte-emissionen#textpart-1>. Letzter Zugriff: 01/2017
- Universität Duisburg-Essen (2014): uni-due.de. <https://www.uni-due.de/nst/News/news.html>. Letzter Zugriff: 05.03.2014
- Universität Duisburg-Essen (2015): uni-due.de. <https://www.uni-due.de/nst/News/news.html>. Letzter Zugriff: 26.08.2015
- Voith Turbo GmbH & Co. KG (2017): voith.com.
<http://www.voith.com/de/produkte-leistungen/antriebstechnik/luftkompressoren-lkw-10167.html>. Letzter Zugriff: 06.04.2017
- Wietschel, M.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Krewitt, W.; Markewitz, P. et al. (Hrsg.) (2010): Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Technologiebericht. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Wilming, W. (2017): ikz.de. <http://www.ikz.de/nc/news/article/grosse-zukunft-fuer-orc-und-kalina-mit-orc-und-k-0056288.html>. Letzter Zugriff: 14.03.2017